



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

# **TESIS DOCTORAL**

**ESTRATEGIAS AVANZADAS DE CONTROL, MODELADO,  
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES DE  
POTENCIA DE ESTADO SÓLIDO (SSPC) PARA SU APLICACIÓN  
EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA  
EMBARCADOS**

**Autor:**

**Daniel Izquierdo Gil**

**Director:**

**Dr. Andrés Barrado Bautista**

**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA**

**Leganés, 22 de Diciembre de 2010**



TESIS DOCTORAL

**ESTRATEGIAS AVANZADAS DE CONTROL, MODELADO,  
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES DE  
POTENCIA DE ESTADO SÓLIDO (SSPC) PARA SU APLICACIÓN  
EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA  
EMBARCADOS**

**AUTOR: Daniel Izquierdo Gil**

**DIRECTOR: Dr. Andrés Barrado Bautista**

Firma del Tribunal Calificador:

Firma

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Calificación:

Leganés, de de





## Agradecimientos

### **EN LO PROFESIONAL**

A Andrés Barrado Bautista, mi director de tesis, por sus consejos, indicaciones, aportaciones y dedicación durante toda la tesis doctoral.

A todos los compañeros del Departamento de Tecnología Electrónica y sus grupos de investigación, y muy especialmente al Grupo de Sistemas Electrónicos de Potencia, que han colaborado con sus criterios, opiniones y ayuda.

A los técnicos de laboratorio por su ayuda en el desarrollo de los dos prototipos.

A Roberto Carlos Hernandez por sus comentarios y ayuda durante la parte experimental del trabajo de investigación.

### **EN LO PERSONAL**

A todos aquellos que me habéis animado a terminar este trabajo de investigación.

A mis padres por su educación, amor y comprensión.

A mis hermanas y hermanos políticos.

A mis amigos.

A mi hija Sara.

Y en especial a mi compañera Guna, por su apoyo incondicional.

**¡ GRACIAS A TODOS !**



# ÍNDICE

<b><u>Título</u></b>	<b><u>Página</u></b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>III</b>
<b>RESUMEN DE LA TESIS .....</b>	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XV</b>
<b>LISTADO DE ACRÓNIMOS .....</b>	<b>XIX</b>
<b>LISTADO DE FIGURAS .....</b>	<b>XXIII</b>
<b>LISTADO DE TABLAS .....</b>	<b>XXXVII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN, MOTIVACIÓN Y PLANTEAMIENTO DE LA TESIS .....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	5
1.2 MOTIVACIÓN.....	9
1.3 OBJETIVOS .....	10
1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	12
1.5 REFERENCIAS .....	15
<b>2. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA EMBARCADOS .....</b>	<b>17</b>
2.1 INTRODUCCIÓN.....	21
2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS.....	22
2.2.1 <i>Sistemas de Generación</i> .....	25
2.2.1.1 Sistemas de generación en corriente continua (CC) .....	26
2.2.1.2 Sistemas de generación de corriente alterna (CA) .....	28
2.2.1.3 Comparativa de los sistemas en CA y CC de generación existentes .....	30
2.2.2 <i>Subsistema de Distribución Primaria</i> .....	32
2.2.2.1 Comparativa de los sistemas de distribución en CA y CC.....	35
2.2.3 <i>Área de Conversión</i> .....	36
2.2.4 <i>Sistemas de baterías</i> .....	38
2.2.5 <i>Distribución secundaria</i> .....	40

2.2.6	Control del sistema eléctrico .....	41
2.3	CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA EMBARCADOS.....	44
2.3.1	Sistemas eléctricos en aviones civiles convencionales .....	44
2.3.1.1	Boeing.....	44
2.3.1.2	Airbus .....	45
2.3.2	Sistemas eléctricos en aviones militares convencionales .....	46
2.3.3	Nuevos sistemas eléctricos.....	49
2.3.3.1	Aviones civiles.....	51
2.3.3.2	Aviones militares .....	54
2.4	INICIATIVAS TECNOLÓGICAS .....	57
2.4.1	POA .....	58
2.4.2	MOET .....	58
2.4.3	Joint Technology Initiative Clean Sky .....	60
2.4.4	HV270DC .....	62
2.4.5	MADMEL.....	63
2.4.6	Otros demostradores.....	63
2.5	REFERENCIAS .....	65
<b>3.</b>	<b>ESTADO DE LA TÉCNICA DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN Y DEL</b>	
	<b>CONTROLADOR DE POTENCIA DE ESTADO SÓLIDO (SSPC) .....</b>	<b>69</b>
3.1	INTRODUCCIÓN.....	73
3.2	DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS .....	74
3.2.1	Fusibles.....	74
3.2.2	Circuitos interruptores (CB).....	76
3.2.3	Circuitos interruptores con detector de fallo por arco (AFCB) .....	78
3.2.4	Circuitos interruptores con control remoto (RCCB) .....	79
3.2.5	Controladores de potencia de estado sólido (SSPC) .....	80
3.2.6	Comparativa entre dispositivos de protección.....	83
3.3	ANTECEDENTES DE LOS SSPC .....	85
3.4	ESTRUCTURA DE LOS CONTROLADORES DE ESTADO SÓLIDO DE POTENCIA .....	90
3.5	PUBLICACIONES, PATENTES Y FABRICANTES .....	92
3.5.1	Patentes relacionadas con el diseño del SSPC.....	95
3.5.2	Patentes relacionadas con la aplicación del SSPC a nivel de sistema .....	99
3.5.3	Fabricantes .....	105
3.6	PROBLEMAS DETECTADOS EN LOS SSPC .....	107
3.6.1	Falsas alarmas.....	107

3.6.2	<i>Inestabilidades del sistema</i> .....	107
3.6.3	<i>Problemas ante perturbaciones EMI</i> .....	108
3.6.4	<i>Problemas en la conexión y desconexión de cargas capacitivas e inductivas</i> .....	108
3.6.5	<i>Falta de aislamiento galvánico de los SSPC</i> .....	109
3.6.6	<i>Limitaciones en la tecnología del semiconductor principal del SSPC</i> .....	109
3.7	CONCLUSIONES .....	111
3.8	REFERENCIAS .....	112
<b>4.</b>	<b>ESTRATEGIAS DE CONEXIÓN DE CARGAS ALTAMENTE CAPACITIVAS</b>	
	<b>MEDIANTE SSPC</b> .....	<b>119</b>
4.1	INTRODUCCIÓN .....	123
4.2	CONEXIÓN DE CARGAS MEDIANTE CONTROL PASIVO DE LA CORRIENTE .....	125
4.2.1	<i>Calculo de los principales parámetros de funcionamiento del SSPC, durante el transitorio, con control pasivo</i> .....	127
4.2.2	<i>Valor máximo de la capacidad del condensador, que se puede conectar mediante el control pasivo</i> .....	135
4.2.3	<i>Ventajas e inconvenientes del control pasivo de la corriente</i> .....	136
4.3	CONEXIÓN DE CARGAS MEDIANTE CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE .....	138
4.3.1	<i>Calculo de los principales parámetros de funcionamiento del SSPC durante el transitorio de conexión con control activo con corriente constante</i> .....	138
4.3.2	<i>Valor máximo de la capacidad del condensador, que se puede conectar con control activo con corriente constante</i> .....	142
4.3.3	<i>Simulación de la conexión mediante control activo con corriente constante</i> .....	143
4.3.4	<i>Ventajas e inconvenientes del control activo con corriente constante</i> .....	145
4.4	CONEXIÓN MEDIANTE CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE .....	147
4.4.1	<i>Calculo de los principales parámetros de funcionamiento del SSPC durante el transitorio de conexión a derivada de corriente constante</i> .....	147
4.4.2	<i>Valor máximo de la capacidad del condensador, que se puede conectar con control activo con derivada constante de la corriente</i> .....	152
4.4.2.1	<i>Cálculo del condensador máximo: método exacto</i> .....	152
4.4.2.2	<i>Calculo del condensador máximo: mediante el polinomio de Taylor orden 3°</i> .....	152
4.4.2.3	<i>Calculo del condensador máximo: mediante el polinomio de Taylor orden 4°</i> .....	153
4.4.2.4	<i>Método simplificado por aproximación gráfica</i> .....	154
4.4.3	<i>Simulación de la conexión con control activo con derivada constante de la corriente</i> .....	157
4.4.4	<i>Ventajas e inconvenientes del control activo con derivada constante de la corriente</i> .....	159
4.5	CONEXIÓN DE CARGAS MEDIANTE CONTROL ACTIVO GENERALIZADO .....	161

4.5.1	Calculo de los principales parámetros de funcionamiento del SSPC durante el transitorio de conexión con control activo generalizado.....	162
4.5.2	Valor máximo de la capacidad del condensador, que se puede conectar mediante control activo generalizado .....	166
4.5.2.1	Calculo del condensador método exacto.....	166
4.5.2.2	Método simplificado por descomposición .....	167
4.5.3	Simulación de la conexión con control activo generalizado.....	167
4.5.4	Ventajas e inconvenientes del control activo generalizado .....	172
4.6	CONEXIÓN DE CARGAS CON CONTROL ACTIVO ÓPTIMO DE LA TRAYECTORIA DE LA CORRIENTE ..	174
4.6.1	Funcionamiento del SSPC con control activo de la trayectoria óptima de la corriente.....	176
4.6.2	Valor máximo de la capacidad del condensador, que se puede conectar con control activo por trayectoria óptima de la corriente .....	178
4.6.3	Simulación de la conexión con control activo óptimo de la trayectoria de la corriente ...	183
4.6.4	Ventajas e inconvenientes del control activo óptimo de la trayectoria de la corriente .....	185
4.7	COMPARATIVA DE LOS MÉTODOS DE CONTROL ACTIVO.....	186
4.8	CONCLUSIONES .....	189
4.9	REFERENCIAS .....	190
<b>5.</b>	<b>MODELADO DEL CONTROLADOR DE POTENCIA DE ESTADO SÓLIDO (SSPC) .....</b>	<b>191</b>
5.1	INTRODUCCIÓN.....	195
5.2	ESTRATEGIAS DE MODELADO DEL SSPC .....	196
5.3	MODELADO ESTRUCTURAL .....	198
5.3.1	Bloques y parámetro, del modelo estructural.....	198
5.3.2	Modelo del semiconductor interno del SSPC .....	199
5.3.3	Modelado del driver de control y la fuente interna de alimentación.....	202
5.3.4	Modelado del Control e Interfaces .....	204
5.3.5	Modelado de la curva de funcionamiento $I^2t$ y protección contra cortocircuito .....	205
5.3.5.1	Generación de las tablas de búsqueda (wire-Temp) y (wire- $I^2t$ ).....	210
5.3.6	Simulaciones de verificación de las curvas $I^2t$ .....	213
5.3.6.1	Simulación con distintos modelos de SSPC con curva $I^2t$ clásica y compensada .....	215
5.3.6.2	Simulación con mismo modelo de SSPC y distintos niveles de corriente constante .....	217
5.3.6.3	Simulación con mismo modelo de SSPC y distinta temperatura ambiental .....	218
5.3.6.4	Simulación con distintos modelos de SSPC, variando los tiempos de reconexión .....	219
5.3.7	Simulaciones de la respuesta dinámica del modelo estructural del SSPC. ....	220
5.4	MODELADO COMPORTAMENTAL .....	222
5.4.1	Modelado del estado estacionario (Bloque A).....	224

5.4.2	<i>Modelado de las conmutaciones (Bloque B)</i> .....	224
5.4.3	<i>Modelado de la protección contra sobrecorriente y la curva <math>I^2t</math> (Bloque C)</i> .....	227
5.4.4	<i>Modelado del bloque del semiconductor (Bloque D)</i> .....	229
5.5	COMPARATIVA DE LOS MODELOS .....	230
5.6	VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO COMPORTAMENTAL DEL SSPC .....	232
5.6.1	<i>Validación dinámica del modelo del SSPC</i> .....	233
5.6.1.1	<i>Validación del modelo de Sensitron incluido en un modulo de 8 SSPC</i> .....	236
5.6.2	<i>Validación del modelo de la curva <math>I^2t</math></i> .....	239
5.7	CONCLUSIONES .....	241
5.8	REFERENCIAS .....	243
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES</b> .....	<b>245</b>
6.1	INTRODUCCIÓN .....	249
6.2	ESTRUCTURA DEL PROTOTIPO DE SSPC DESARROLLADO .....	251
6.2.1	<i>Semiconductor de Potencia [Bloque 1]</i> .....	253
6.2.2	<i>Driver y circuitos de control activo/pasivo del semiconductor [Bloque 2]</i> .....	253
6.2.2.1	<i>Regulación lineal de la tensión en el condensador Cg</i> .....	254
6.2.2.2	<i>Regulación conmutada de la tensión en el condensador Cg</i> .....	255
6.2.3	<i>Bloque de alimentación interno del SSPC [Bloque 3]</i> .....	256
6.2.4	<i>Bloque de medida de la tensión en la carga [Bloque 4]</i> .....	257
6.2.5	<i>Bloque de la medida de la corriente por el SSPC [Bloque 5]</i> .....	258
6.2.6	<i>Bloque interfaces y control del SSPC [Bloque 6]</i> .....	259
6.2.7	<i>Aislamiento optoelectrónico</i> .....	260
6.3	RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS ESTRATEGIAS DE CONEXIÓN .....	261
6.3.1	<i>Resultados experimentales del control pasivo</i> .....	261
6.3.2	<i>Resultados experimentales del control activo con derivada constante de la corriente</i> .....	267
6.3.2.1	<i>Mediante la regulación lineal de la tensión en el condensador Cg</i> .....	268
6.3.2.2	<i>Mediante la regulación conmutada de la tensión del condensador Cg</i> .....	270
6.3.3	<i>Resultados experimentales del control activo con corriente constante</i> .....	276
6.3.4	<i>Resultados experimentales del control activo generalizado</i> .....	283
6.3.5	<i>Resultados experimentales del control activo por trayectoria óptima de la corriente</i> .....	289
6.4	RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA ACTIVACIÓN DE LAS PROTECCIONES .....	295
6.4.1	<i>Validación experimental de la curva <math>I^2t</math></i> .....	295
6.4.1.1	<i>Validación de la curva <math>I^2t</math> clásica mediante sobrecorriente constante</i> .....	296
6.4.1.2	<i>Validación de la memoria térmica en la curva <math>I^2t</math></i> .....	298
6.4.1.3	<i>Validación del efecto de disipación térmica en los cables en la curva <math>I^2t</math></i> .....	299

6.4.2	<i>Protección contra sobrecorriente 480% de la corriente nominal</i>	300
6.5	MODELADO ESTRUCTURAL DEL PROTOTIPO	302
6.5.1	<i>Modelado del control pasivo</i>	303
6.5.2	<i>Modelado del control activo con corriente constante</i>	306
6.5.3	<i>Modelado del control activo con derivada constante de la corriente</i>	309
6.5.4	<i>Modelado del control activo generalizado</i>	311
6.5.5	<i>Modelado del control activo por trayectoria óptima de la corriente</i>	313
6.6	MODELADO COMPORTAMENTAL DEL PROTOTIPO	316
6.6.1	<i>Modelado comportamental del control activo con corriente constante</i>	317
6.6.2	<i>Modelado del control activo con derivada constante de la corriente</i>	318
6.6.3	<i>Modelado del control activo generalizado</i>	320
6.7	RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL SSPC IMPLEMENTADO CON DIFERENTE TECNOLOGÍA DE SEMICONDUCTOR: MOSFET VS IGBT	322
6.8	CONCLUSIONES	325
6.9	REFERENCIAS	327
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES, APORTACIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>329</b>
7.1	CONCLUSIONES Y APORTACIONES DEL PRESENTE TRABAJO	333
7.1.1	<i>Aportaciones relacionadas con las estrategias de conexión de cargas muy capacitivas y con la implementación con distintas tecnologías</i>	333
7.1.2	<i>Aportaciones relacionadas con el modelado del SSPC</i>	336
7.2	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	339
<b>8.</b>	<b>DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA TESIS DOCTORAL</b>	<b>341</b>
8.1	INTRODUCCIÓN	345
8.2	ÁREAS DE APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	346
8.2.1	<i>Proyectos Tecnológicos</i>	346
8.2.1.1	Subprograma Nacional de Transporte Aéreo (MEDEA)	346
8.2.1.2	Sistema de distribución de cargas de HVDC de EADS-CASA	346
8.2.1.3	Diseño y modelado de sistemas electrónicos aeroespaciales (DIMOS)	347
8.2.1.4	Sistemas de Alimentación para Aplicaciones Embarcadas y Portátiles basadas en Fuentes y Dispositivos de Almacenamiento de Energía Emergentes (SAUCE)	347
8.2.2	<i>Patentes</i>	347
8.2.3	<i>Publicaciones</i>	348
8.2.3.1	Publicaciones en Revistas Internacionales	348
8.2.3.2	Publicaciones en Congresos Internacionales	348



---

8.2.3.3	Publicaciones en Congresos Nacionales .....	349
8.2.3.4	Publicaciones en revisión .....	349
8.2.4	<i>Proyecto final de carrera</i> .....	350
8.3	OTRAS ACTIVIDADES, PUBLICACIONES Y PATENTES DE INTERÉS .....	351
8.3.1	<i>Patentes</i> .....	351
8.3.2	<i>Otros artículos de interés en congreso</i> .....	351
8.3.3	<i>Proyecto fin de máster</i> .....	352
<b>ANEXO A</b>	.....	<b>353</b>
<b>ANEXO B</b>	.....	<b>367</b>



## **RESUMEN DE LA TESIS**

Actualmente, existe una fuerte tendencia en los nuevos diseños de aviones militares y civiles hacia el concepto de avión más eléctrico ó totalmente eléctrico. Esto es debido principalmente a la substitución de los sistemas mecánicos, neumáticos e hidráulicos por sistemas parcial o totalmente eléctricos.

El concepto de avión más eléctrico presenta una serie de ventajas o mejoras frente a los aviones convencionales, desde el punto de vista de eficiencia, peso, volumen, impacto ambiental, etc. En estos aviones los tradicionales sistemas de distribución de potencia eléctrica (SDPE) son un elemento clave debido, principalmente, a los nuevos requisitos de demanda de potencia y las funcionalidades requeridas. Esto ha provocado que los nuevos sistemas eléctricos hayan evolucionado hacia nuevas arquitecturas de distribución, basadas en sistemas distribuidos, donde los tradicionales niveles de tensión  $28 V_{CC}$  y  $115 V_{CA}$ , han sido substituidos por niveles de  $270 V_{CC}$ ,  $\pm 270 V_{CC}$  y  $230 V_{CA}$ .

Los nuevos SDPE han originado que los aviones más eléctricos requirieran de un mayor número de equipos electrónicos, como son convertidores CC/CC, rectificadores, inversores y protecciones de estado sólido, que permiten hacer frente a las necesidades planteadas en estas nuevas arquitecturas.

Un elemento clave de estos nuevos SDPE es la introducción de los controladores de potencia de estado sólido (SSPC) como elementos de protección del cableado y de control de las cargas eléctricas. Estos dispositivos permiten la substitución de los magneto-térmicos y relés que se usan en los convencionales SDPE, los cuales presentan problemas de funcionamiento en los nuevos SDPE debido, principalmente, a los cambios en los niveles de tensión. Además, el desarrollo de la funcionalidad y nuevas capacidades de los SSPC está ligado a la configuración de las nuevas arquitecturas de los sistemas eléctricos,

a los elementos con los que interaccionan, su localización dentro de la arquitectura y las cargas a las que se conectan.

Dentro de estos sistemas, la conexión de determinadas cargas, como las altamente capacitivas, implica la necesidad de desarrollar nuevas estrategias de control orientados a mejorar el proceso de conexión de este tipo de cargas. En este trabajo de investigación, se ha realizado un análisis detallado de cinco procedimientos de conexión de cargas altamente capacitivas, mediante circuitos de control constituidos con elementos pasivos y activos. De este modo, se han presentado nuevos procedimientos de control activo de la corriente por el SSPC, aplicables durante la conexión, que permiten conectar cargas altamente capacitivas.

Las estrategias de control activo, desarrolladas en esta tesis doctoral, que permiten la conexión de cargas muy capacitivas son: control activo por corriente constante, control activo por derivada de corriente constante, control activo generalizado y control activo por trayectoria óptima de la corriente. En cada uno de los métodos de conexión de cargas altamente capacitivas, se han definido ecuaciones sencillas que permiten calcular el condensador máximo que es posible cargar en función del tiempo de la conexión, la corriente nominal, la corriente máxima y el valor de la parte resistiva de la carga.

Por otro lado, teniendo en cuenta el incremento de la complejidad de los nuevos SDPE embarcados, los modelos de los SSPC juegan un papel fundamental a la hora de reproducir el funcionamiento de estos componentes y anticipar posibles problemas de funcionamiento dentro de las nuevas arquitecturas. No obstante, los fabricantes de SSPC no proporcionan modelos de estos dispositivos. Por lo tanto, con el fin de analizar los efectos de estos nuevos dispositivos de protección en los sistemas embarcados, se hace necesario desarrollar nuevos modelos de SSPC, que permitan, en un primer lugar, predecir fallos de funcionamiento y, en segundo lugar, detectar los efectos introducidos por los SSPC en los sistemas una vez integrados junto al resto del componentes, simplificando el proceso de validación de la funcionalidad de todo el sistema. Por estas razones, otro de los objetivos planteados en esta tesis es el desarrollo de modelos que

permitan validar el comportamiento de los SSPC, durante las diferentes fases del proceso de desarrollo y posterior integración dentro del SDPE.

Así pues, en esta tesis se presentan dos tipos de modelos aplicables a los SSPC. El primero se denomina modelo estructural, y está basado en la estructura del componente. Este tipo de modelo es específico para cada fabricante de SSPC y tiene que ser modificado de acuerdo con la estructura interna de cada uno de los SSPC. El modelo permite detectar problemas durante las fases de diseño, previo al montaje final del dispositivo. En este modelo estructural se incluyen algoritmos, que permiten calcular los tiempos de activación de distintos tipos de protecciones ( $I^2t$ , sobrecorriente, cortocircuito, etc.). El segundo modelo propuesto en la tesis es el basado en el modelado comportamental del SSPC. Este modelo se fundamenta en bloques, que son totalmente independientes de la estructura interna del SSPC. Esto permite configurarlo de acuerdo con las hojas de características proporcionadas por el fabricante y las medidas experimentales del dispositivo comercial. Otra de las ventajas de este modelo es la sencillez con la que se puede exportar a distintas plataformas de simulación. Los modelos comportamentales propuestos han sido validados con SSPC comerciales.

Finalmente, en esta tesis se han desarrollado dos prototipos de SSPC. El prototipo final ha permitido validar experimentalmente las diferentes estrategias de control para la conexión de cargas altamente capacitivas mediante el uso del SSPC con tecnología MOSFET. Además, se han validado diferentes funcionalidades del SSPC, como puede ser la protección  $i^2t$ , la protección contra cortocircuito, el efecto de la memoria térmica, y la disipación de la temperatura, etc. Por otra parte, se ha validado el modelo estructural y el modelo comportamental, a partir de las medidas experimentales sobre el prototipo construido. Por último, se han validado el funcionamiento del prototipo de SSPC con tecnología IGBT.



## **ABSTRACT**

There is a strong trend in the new designs of military and civil aircraft towards the concept of more or fully electric aircraft. This is mainly due to the replacement of pneumatic and hydraulic systems by fully or partially electrical systems. The concept of more electric aircraft presents a series of advantages and improvements in comparison with conventional aircraft, from the point of view of efficiency, weight, volume, environmental impact, etc.

In these new aircrafts the electrical power distribution systems (PDS) are the key element, principally due to the new requirements of demanded power and the required functionality. Therefore the new electrical systems have evolved towards new distribution architectures based on distributed systems, where traditional voltages levels at 28 V<sub>DC</sub> and 115 V<sub>AC</sub>, have been replaced by levels of 270 V<sub>DC</sub>,  $\pm 270$  V<sub>DC</sub> and 230 V<sub>AC</sub>. Because of these new PDS, more electric aircrafts require a greater number of electronic equipments, such as converters, rectifiers, inverters and solid state protections, that allow to fulfil the needs arising from these new architectures.

One of the key elements of these new PDS is the introduction of the solid state power controllers (SSPC) as elements of wiring protection and control of the electrical loads. These devices allow to replace the magneto-thermal and relays that are used in the conventional SDP, since these conventional devices present operational problems in the new PDS, due mainly to the changes in the voltage levels. Furthermore, the development of the new functionality and capabilities of the SSPC are related to: the configuration of the new PDS architectures, the elements that interact, their location within the architecture and the loads to which they connect.

Within these systems, the connection of certain loads, such as the highly capacitive loads, imply the need to develop new control strategies to improve the process the connection of such loads. In this research, a detailed analysis of five procedures for connecting highly

capacitive loads has been done. The five procedures are implemented with control circuits made with passive and active elements. Therefore, new methods have been presented in order to obtain the active control of the current through the SSPC, applicable during connection period, which allow the connection of highly capacitive loads. The active control methods developed within this thesis are the following: active control with constant current, active control with slope constant current, generalized active control and active control by optimum trajectory current. Each method has been defined by simple equations that allow to calculate the maximum capacitor that is possible to be charged during the connection, as a function of the nominal current, the maximum current and the value of the resistive component part of the load.

Taking into the account the complexity of the new onboard PDS, the SSPC models play a fundamental role when the function of the components is being reproduced to anticipate potential problems of operating within the new architectures. However, SSPC manufacturers do not provide models of these devices. In order to analyze the effects of these new devices of the onboard systems, it is necessary to develop new models of SSPC, which allow, on one hand, predicting malfunctions and, on the other hand, detecting the effects inducted by the SSPC in PDS when integrated with the rest of the components. Thus, these models allow simplifying the process of validating the functionality of the whole system. Therefore, one of the goals outlined in the thesis has been the development of the models that allow to validate the behaviour of SSPC during the different stages of the development process and their further integration in the PDS.

In this thesis two types of models have been presented, that are applicable to the SSPC. The first type is a structural model, and it is based on the internal structure of the SSPC. This model allows to detect problems during the design phases, before final assembly of the device. The second model, which has been proposed in the thesis, is based on the SSPC behavioural modelling. This model is divided in blocks, which are entirely independent of the of the SSPC internal structure. Therefore, it can be configured according to the datasheets provided by the manufacturers and the experimental measurements of the commercial device. Another advantage of this model is that it can be



easily exported to different simulation platforms. The proposed behavioural models have been validated with two commercial SSPC (DDC and Sensitron manufacturers).

Finally, in this thesis have been developed two prototypes of SSPC. The final prototype allows verifying experimentally the different control strategies for connecting highly capacitive loads, using MOSFET technology. There have also been validated different SSPC functionalities, such as  $I^2t$  protection, short circuit protection, thermal memory effect, etc. Moreover, there have been validated the structural and the behavioural model, based on the experimental measurements of the final prototype. Finally, the operating of the SSPC prototype based on IGBT technology has been also validated.



## **LISTADO DE ACRÓNIMOS**

AC	Alternating Current
ADP	Air Driven Pump
AEA	All Electric Aircraft
AFCB	Arc Fault Circuit Breaker
APU	Auxiliary Power Unit
BCRU	Battery Charge Regulator Unit
BJT	Bipolar Junction Transistor
BPCU	Bus Power Control Unit
CA	Corriente Alterna
CB	Circuit Breaker
CC	Corriente Continua
CIAE	Circuito Integrado de Aplicación Específica
CSD	Constant Speed Drive
DC	Direct Current
DEPMA	Distributed Electrical Power Management Architecture
DSP	Digital Signal Processor
DSSPC	Digital Solid State Power Controller
ELCU	Electronic Load Control Unit

ELMC	Electric Load Management Center
ELMS	Electrical Load Management System
EMI	Electromagnetic Interference
FC	Frecuencia Constante
FV	Frecuencia Variable
GCU	Generator Control Unit
GPU	Ground Power Unit
HV270DC	High Voltage 270 Direct Current
IDG	Integrated Drive Generator
LMC	Load Management Computer
LRU	Line Replaceable Unit
LRM	Line Replaceable Module
MADMEL	Power Management and Distribution System for a More Electric Aircraft
MBC	Mantenimiento Basado en Condiciones
MEA	More Electric Aircraft
MOET	More Open Electrical Technology
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PDEU	Power Drive Electronics Unit
PLMU	Power Load Management Unit

PMG	Permanent Magnet Generator
POA	Power Optimized Aircraft
RAT	Ram Air Turbine
RCCB	Remote Control Circuit Breaker
SDP	Sistema de Distribución de Potencia
SDSP	Sistema de Distribución Secundaria de Potencia
S/G	Starter/Generator
SOA	Safety Operating Area
SPDU	Secondary Power Distribution Unit
SSPC	Solid State Power Controller
TIMES	Totally Integrated More Electric Systems
TRU	Transformer-Rectifier Unit
UDP	Unidad de Distribución de Potencia
UDSP	Unidad de Distribución Secundaria de Potencia
VVFC	Velocidad Variable Frecuencia Constante



xxiii

FIGURA 3.1: FUSIBLES FABRICADOS POR MTA© .....	75
FIGURA 3.2: SOPORTES PORTA FUSIBLES FABRICADOS POR MTA © .....	75
FIGURA 3.3: CAJAS PORTA FUSIBLES FABRICADAS POR BEP MARINE © .....	76
FIGURA 3.4: CURVA TÍPICA DE SOBRECARGA CORRIENTE NOMINAL-TIEMPO PARA CB .....	76
FIGURA 3.5: CB (A) FABRICADO POR KLIXON © Y CB (B) FABRICADO POR E-T-A © .....	77
FIGURA 3.6: AFCB FABRICADO POR E-T-A© .....	78
FIGURA 3.7: RCCB FABRICADO POR E-T-A .....	79
FIGURA 3.8: DIAGRAMA DE UN RCCB .....	80
FIGURA 3.9: SSPC FABRICADO POR DDC © .....	81
FIGURA 3.10: DISTRIBUCIÓN SECUNDARIA MEDIANTE SSPC .....	82
FIGURA 3.11: COMPARATIVA DE ALGUNOS DE LOS PARÁMETROS REPRESENTATIVOS DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN ACTUALES .....	84
FIGURA 3.12: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROLADOR DE POTENCIA REMOTO, RPC .....	85
FIGURA 3.13: CONMUTADOR DE POTENCIA DE CC DE ESTADO SÓLIDO .....	86
FIGURA 3.14: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SSPC FABRICADO POR DDC .....	86
FIGURA 3.15: CURVA ESTÁNDAR $I^2T$ DEL SSPC .....	87
FIGURA 3.16: MODULO SSPC INCLUIDO EN LA ESTACIÓN INTERNACIONAL .....	89
FIGURA 3.17: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SSPC .....	90
FIGURA 3.18: DIAGRAMA DE BLOQUES DE SSPC IMPLEMENTADO CON IGBT .....	93
FIGURA 3.19: DIAGRAMA DE BLOQUES DE SSPC CON LIMITADOR DE CORRIENTE .....	93
FIGURA 3.20: DIAGRAMA DE BLOQUES DE SSPC CON EFECTO MEMORIA TÉRMICA .....	94
FIGURA 3.21: EVOLUCIÓN EN LA PUBLICACIÓN DE PATENTES RELACIONADAS CON EL SSPC .....	95
FIGURA 3.22: DIAGRAMA DE BLOQUES DE SSPC CON MODO “SLEEP” .....	96
FIGURA 3.23: DIAGRAMA DE BLOQUES DE SSPC CON MICROCONTROLADORES .....	97
FIGURA 3.24: CONTROL REDUNDANTE CON FUNCIÓN BACK-UP MEMORIZADA .....	98
FIGURA 3.25: UDSP CONFIGURABLE .....	100
FIGURA 3.26: DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN ELMC .....	101
FIGURA 3.27: UDSP CON CONEXIÓN DIRECTA CONTROL-SSPC VÍA BUS SERIE .....	102
FIGURA 3.28: SDSP INTELIGENTE CON MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIONES (MBC) .....	104
FIGURA 3.29: SSPC COMO INTERRUPTOR DE ENLACE ENTRE BUSES .....	105
FIGURA 3.30: UNIDAD DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA CON SSPC FABRICADA POR LEACH .....	106
FIGURA 3.31: MODELO SIMPLIFICADO DE SSPC .....	107
FIGURA 4.1: CIRCUITO DE CONEXIÓN DE CARGA MEDIANTE SSPC .....	125
FIGURA 4.2: TENSIÓN Y CORRIENTE EN EL SSPC DURANTE LA CONEXIÓN DE UNA CARGA CAPACITIVA SIN CONTROL DE LA CORRIENTE .....	125
FIGURA 4.3: CIRCUITO PROPUESTO PARA EL CONTROL PASIVO DEL ENCENDIDO DEL SEMICONDUCTOR .....	126



FIGURA 4.4: ZONAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MOSFET, CON CANAL N.....	128
FIGURA 4.5: DESPLAZAMIENTO DEL EJE DE TIEMPOS .....	129
FIGURA 4.6: CORRIENTE POR EL SSPC Y LA RESISTENCIA DURANTE LA CONEXIÓN CON CONTROL PASIVO..	132
FIGURA 4.7: EVOLUCIÓN DE LA EXPONENCIAL CON RESPECTO A LA APROXIMACIÓN MEDIANTE EL POLINOMIO DE TAYLOR .....	133
FIGURA 4.8: TENSIÓN EN LA CARGA Y EN EL SSPC CON CONTROL PASIVO DE LA TENSIÓN DE PUERTA.....	133
FIGURA 4.9: POTENCIA DISIPADA POR EL SSPC, CON CONTROL PASIVO .....	134
FIGURA 4.10: CONEXIÓN DE LA CARGA CON CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE .....	138
FIGURA 4.11: TENSIONES EN LA CARGA Y EL SSPC CON CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE....	140
FIGURA 4.12: POTENCIA DISIPADA POR EL SSPC, CON CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE.....	141
FIGURA 4.13: CIRCUITO DE SIMULACIÓN DE LA ESTRATEGIA BASADA EN CONTROL ACTIVO MEDIANTE CORRIENTE CONSTANTE.....	143
FIGURA 4.14: SIMULACIÓN DE CONEXIÓN DE CARGA, CON CORRIENTE MÁXIMA CONSTANTE .....	144
FIGURA 4.15: CONEXIÓN DE LA CARGA CON CONTROL DE LA TENSIÓN DE PUERTA .....	147
FIGURA 4.16: TENSIÓN DE LA CARGA Y EN EL SSPC CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE.....	150
FIGURA 4.17: POTENCIA DISIPADA POR EL SSPC CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE .....	150
FIGURA 4.18: SIMULACIÓN DE CONEXIÓN DE CARGA, CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE .....	158
FIGURA 4.19: CONEXIÓN DE LA CARGA MEDIANTE CONTROL ACTIVO GENERALIZADO .....	161
FIGURA 4.20: TENSIÓN DE LA CARGA Y DEL SSPC CON CONTROL ACTIVO GENERALIZADO .....	164
FIGURA 4.21: POTENCIA DISIPADA POR EL SSPC, CON CONTROL ACTIVO GENERALIZADO .....	165
FIGURA 4.22: SIMULACIÓN DE CONEXIÓN DE CARGA, MEDIANTE CONTROL ACTIVO GENERALIZADO .....	168
FIGURA 4.23: ÁREA DE OPERACIÓN SEGURA (SOA) DEL MOSFET, MODELO STY60NM50 .....	174
FIGURA 4.24: ÁREA DE OPERACIÓN SEGURA (SOA), DEL IGBT MODELO 50N60B2 .....	174
FIGURA 4.25: CONEXIÓN MEDIANTE EL CONTROL ACTIVO ÓPTIMO DE LA TRAYECTORIA DE LA CORRIENTE	177
FIGURA 4.26: DESCOMPOSICIÓN DE LA CONEXIÓN CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE Y CORRIENTE INICIAL DISTINTA DE CERO .....	178
FIGURA 4.27: CONEXIÓN MEDIANTE EL CONTROL ACTIVO ÓPTIMO DE LA TRAYECTORIA DE LA CORRIENTE	180
FIGURA 4.28: SIMULACIÓN DE CONEXIÓN DE CARGA, CON CONTROL ACTIVO ÓPTIMO DE LA TRAYECTORIA DE LA CORRIENTE .....	183
FIGURA 4.29: ÁREA DE OPERACIÓN SEGURA (SOA) DEL MOSFET, MODELO STY60NM50 .....	186
FIGURA 4.30: COMPARATIVA DE LA POTENCIA DISIPADA POR EL SSPC, PARA EL MISMO TIEMPO DE CONEXIÓN Y CON DIFERENTES CAPACIDADES: MEDIANTE CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE (1), CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE (2), CONTROL ACTIVO GENERALIZADO (3) Y CONTROL ACTIVO CON CONTROL ÓPTIMO DE LA TRAYECTORIA DE LA CORRIENTE (4).....	187
FIGURA 5.1: MODELO ESTRUCTURAL DEL SSPC .....	198

FIGURA 5.2: ZONAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MOSFET, CON CANAL N .....	200
FIGURA 5.3: MODELO DE MOSFET EN PSIM GENERADO A PARTIR DE SU MODELO EN PSPICE (STY60NM50) .....	200
FIGURA 5.4: MODELO ELÉCTRICO DEL NÚCLEO DEL MOSFET (STY60NM50) .....	202
FIGURA 5.5: ESTRUCTURA DEL MODELO INTERNO DEL SSPC INCLUYENDO EL DRIVER Y EL MOSFET.....	203
FIGURA 5.6: MODELO ELÉCTRICO SIMPLIFICADO DEL DRIVER DEL SSPC .....	204
FIGURA 5.7: ENCAPSULADO DEL MODELO ESTRUCTURAL DEL SSPC .....	204
FIGURA 5.8: CURVA ESTÁNDAR $I^2T$ DEL SSPC .....	205
FIGURA 5.9: EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DE UN CABLE DE GALGA 16 BASADA EN LA SIMULACIÓN TÉRMICA ANSYS (TEMPERATURA AMBIENTAL 0°C) [IZQUIERDO10].....	206
FIGURA 5.10: IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE LA PROTECCIÓN $I^2T$ Y CORTOCIRCUITO .....	208
FIGURA 5.11: COMPARATIVA DE LOS MODELOS DE LAS CURVAS $I^2T$ NORMAL Y COMPENSADA .....	210
FIGURA 5.12: EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DE UN CABLE DE GALGA 16 BASADA EN LA SIMULACIÓN TÉRMICA ANSYS (TEMPERATURA AMBIENTAL 0°C) [IZQUIERDO10].....	211
FIGURA 5.13: FUNCIÓN GENERADA EN EXCEL DEL DECREMENTO DE LA TEMPERATURA DEL CABLE, EN 6 SEGUNDOS, EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL CABLE .....	211
FIGURA 5.14: ALGORITMO DE CÁLCULO DE LA TABLA DE BÚSQUEDA WIRE- $I^2T$ , COMPENSADA CON LA DISIPACIÓN TÉRMICA DEL CABLE .....	212
FIGURA 5.15: SIMULACIÓN DEL MODELO DE LA TEMPERATURA DEL CABLE .....	213
FIGURA 5.16. BANCO VIRTUAL DE PRUEBAS PARA DOS SSPC.....	214
FIGURA 5.17: COMPARATIVA DE LOS MODELOS DE LOS SSPC CON CURVA $I^2T$ CLÁSICA Y COMPENSADA CON EFECTO ENFRIAMIENTO, CON CORRIENTE CONTINUA DE $I=68,5$ A .....	215
FIGURA 5.18: COMPARATIVA DE DOS MODELOS DE SSPC CON CURVA $I^2T$ CLÁSICA Y COMPENSADA CON EFECTO ENFRIAMIENTO, ANTE UNA CORRIENTE PULSANTE, $I_p = 68,5$ A .....	216
FIGURA 5.19: COMPARATIVA DE LOS TIEMPOS DE ACTIVACIÓN DE LA PROTECCIÓN $I^2T$ COMPENSADA, CON LA MISMA TEMPERATURA AMBIENTAL DEL CABLE Y DIFERENTE NIVEL DE CORRIENTE POR LA CARGA. ....	217
FIGURA 5.20: COMPARATIVA DE LOS TIEMPOS DE ACTIVACIÓN DE LA PROTECCIÓN $I^2T$ COMPENSADA, ANTE DIFERENTES TEMPERATURAS AMBIENTALES Y EL MISMO NIVEL DE CORRIENTE. ....	218
FIGURA 5.21: COMPARATIVA DE LA ACTUACIÓN DE LA PROTECCIÓN CON DIFERENTES RESET TIME EN LOS MODELOS DE SSPC CON $I^2T$ COMPENSADA.....	219
FIGURA 5.22: COMPARATIVA EN LA CONMUTACIÓN ENTRE CARGA CAPACITIVA Y RESISTIVA DURANTE EL ON/OFF DEL SSPC .....	220
FIGURA 5.23. TENSIÓN EN EL BUS DURANTE LA CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN DE CARGAS INDUCTIVAS Y CAPACITIVAS. ....	221
FIGURA 5.24: DIAGRAMA DEL MODELO COMPORTAMENTAL DEL SSPC .....	222

FIGURA 5.25: DIAGRAMA DEL MODELO COMPORTAMENTAL DEL SSPC.....	223
FIGURA 5.26: MEDIDA DEL SSPC DURANTE LA CONEXIÓN DE (A) UNA CARGA RESISTIVA (B) UNA CARGA RESISTIVA-CAPACITIVA Y (C) LA DESCONEXIÓN DE UNA CARGA RESISTIVA.....	225
FIGURA 5.27: BLOQUE DE CONMUTACIÓN ON/OFF A PARTIR DE MONOESTABLES.....	226
FIGURA 5.28: CIRCUITO COMPORTAMENTAL DE LA CURVA $I^2_T$ .....	227
FIGURA 5.29. DETALLE DEL CIRCUITO DE RECONEXIÓN EN EL MODELO DE SSPC DE SENSITRON .....	229
FIGURA 5.30: BANCO DE ENSAYOS HVDC EN EADS.....	233
FIGURA 5.31: CORRIENTE Y TENSIÓN MEDIDAS DURANTE ON/OFF, CON CARGA RESISTIVA. SSPC FABRICADO POR DDC. CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA. CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC. CANAL M: TENSIÓN EN EL SSPC.....	233
FIGURA 5.32: TENSIÓN Y CORRIENTE SIMULADA DURANTE EL ON/OFF, CON CARGA RESISTIVA. MODELO COMPORTAMENTAL PARA EL SSPC DE DDC .....	233
FIGURA 5.33: CORRIENTE Y TENSIÓN MEDIDAS DURANTE ON/OFF, CON CARGA CAPACITIVA. SSPC FABRICADO POR DDC. CANAL 2: TENSIÓN EN LA CARGA. CANAL 4: CORRIENTE POR EL SSPC. CANAL M: TENSIÓN EN EL SSPC.....	234
FIGURA 5.34: TENSIÓN Y CORRIENTE SIMULADA DURANTE EL ON/OFF, CON CARGA CAPACITIVA. MODELO COMPORTAMENTAL PARA EL SSPC DE DDC .....	234
FIGURA 5.35: CORRIENTE Y TENSIÓN MEDIDAS DURANTE ON/OFF, CON CARGA RESISTIVA. SSPC FABRICADO POR SENSITRON. CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA. CANAL 4: CORRIENTE POR EL SSPC. CANAL M: TENSIÓN EN EL SSPC.....	235
FIGURA 5.36: TENSIÓN Y CORRIENTE SIMULADA DURANTE EL ON/OFF, CON CARGA RESISTIVA. MODELO COMPORTAMENTAL PARA EL SSPC DE SENSITRON.....	235
FIGURA 5.37: CORRIENTE Y TENSIÓN MEDIDAS DURANTE ON/OFF, CON CARGA CAPACITIVA. SSPC FABRICADO POR SENSITRON. CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA. CANAL 4: CORRIENTE POR EL SSPC. CANAL M: TENSIÓN EN EL SSPC.....	236
FIGURA 5.38: TENSIÓN Y CORRIENTE SIMULADA DURANTE EL ON/OFF, CON CARGA CAPACITIVA. MODELO COMPORTAMENTAL PARA EL SSPC DE SENSITRON.....	236
FIGURA 5.39: TENSIÓN Y CORRIENTE MEDIDAS DURANTE EL ENCENDIDO Y EL APAGADO, CON CARGA CAPACITIVA (27 $\Omega$ Y 62 $\mu$ F). SSPC DE SENSITRON .....	237
FIGURA 5.40: TENSIÓN Y CORRIENTE SIMULADAS DURANTE EL ENCENDIDO Y EL APAGADO, CON CARGA CAPACITIVA (27 $\Omega$ Y 62 $\mu$ F). SSPC DE SENSITRON .....	237
FIGURA 5.41: TENSIÓN Y CORRIENTE MEDIDAS DURANTE EL ENCENDIDO Y EL APAGADO CON CARGA CAPACITIVA (27 $\Omega$ Y 75 $\mu$ F). SSPC DE SENSITRON .....	238
FIGURA 5.42: TENSIÓN Y CORRIENTE SIMULADAS DURANTE EL ENCENDIDO Y EL APAGADO, CON CARGA CAPACITIVA (27 $\Omega$ Y 75 $\mu$ F). SSPC DE SENSITRON .....	238

FIGURA 5.43: CORRIENTE SIMULADA POR EL SSPC DURANTE LA ACTIVACIÓN DE LA PROTECCIÓN $I^2T$ . MODELO COMPORTAMENTAL DEL SSPC DE DDC .....	239
FIGURA 5.44: MEDIDA REAL DE LA CORRIENTE POR EL SSPC DURANTE LA ACTIVACIÓN DE LA PROTECCIÓN $I^2T$ . SSPC FABRICADO POR DDC.....	239
FIGURA 5.45: CORRIENTE SIMULADA POR EL SSPC DURANTE LA ACTIVACIÓN DE LA PROTECCIÓN $I^2T$ . MODELO COMPORTAMENTAL DEL SSPC DE SENSITRON .....	240
FIGURA 5.46: MEDIDA REAL DE LA CORRIENTE POR EL SSPC DURANTE LA ACTIVACIÓN DE LA PROTECCIÓN $I^2T$ . SSPC FABRICADO POR SENSITRON .....	240
FIGURA 6.1: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROTOTIPO DE SSPC .....	251
FIGURA 6.2: SITUACIÓN DE LOS BLOQUES EN LA PLACA BASE DEL PROTOTIPO DE SSPC.....	252
FIGURA 6.3: PROTOTIPO DE SSPC DESARROLLADO.....	252
FIGURA 6.4: CIRCUITO DE CONTROL DE LA TENSIÓN $V_{GS}$ .....	253
FIGURA 6.5: DETALLE DEL CIRCUITO DE REGULACIÓN DE CARGA Y DESCARGA DE $C_G$ .....	254
FIGURA 6.6: DETALLE DEL CIRCUITO DE CONTROL MEDIANTE LA REGULACIÓN LINEAL.....	255
FIGURA 6.7: DETALLE DEL CIRCUITO DE CONTROL MEDIANTE LA REGULACIÓN CONMUTADA .....	256
FIGURA 6.8: FUENTE DE ALIMENTACIÓN INTERNA.....	257
FIGURA 6.9: PUENTE RESISTIVO MÁS UN AMPLIFICADOR EN CONFIGURACIÓN INVERSORA.....	258
FIGURA 6.10: TARJETA DE DESARROLLO ENCARGADA DEL CONTROL DE SSPC, C8051F120-DK.....	259
FIGURA 6.11: ESQUEMA DE UN OPTOACOPLADOR LINEAL CON EL IL300 .....	260
FIGURA 6.12: BANCO DE ENSAYOS DEL PROTOTIPO EN EL LABORATORIO DEL GSEP .....	261
FIGURA 6.13: CIRCUITO DE CONTROL PASIVO PROPUESTO .....	262
FIGURA 6.14: CONTROL PASIVO CON $R_{GON}=1\text{ k}\Omega$ , $R_{GOFF}=1\text{ k}\Omega$ Y $C_G=220\text{ nF}$ ( $\tau_{GS}=0,220\text{ ms}$ ) DURANTE EL INTERVALO DE CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN DE LA CARGA. CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{CARGA}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{SSPC}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{SSPC}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{GS}$ ). TENSIÓN DE BUS 100 V .....	263
FIGURA 6.15: CONTROL PASIVO CON $R_{GON}=1\text{ k}\Omega$ , $R_{GOFF}=1\text{ k}\Omega$ Y $C_G=680\text{ nF}$ ( $\tau_{GS}=0,680\text{ ms}$ ) Y DURANTE EL INTERVALO DE CONEXIÓN Y LA DESCONEXIÓN DE LA CARGA. CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{CARGA}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{SSPC}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{SSPC}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{GS}$ ). TENSIÓN DE BUS 100 V .....	264
FIGURA 6.16: CONTROL PASIVO CON $R_{GON}=1\text{ k}\Omega$ Y $R_{GOFF}=1\text{ k}\Omega$ , $C_G=1\text{ }\mu\text{F}$ ( $\tau_{GS}=1\text{ ms}$ ) DURANTE LA CONEXIÓN Y LA DESCONEXIÓN DE LA CARGA. CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{CARGA}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{SSPC}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{SSPC}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{GS}$ ). TENSIÓN DE BUS 100 V .....	264
FIGURA 6.17: CONTROL PASIVO CON $R_{GON}=2,2\text{ k}\Omega$ , $R_{GOFF}=6,8\text{ k}\Omega$ Y $C_G=680\text{ nF}$ DURANTE LA CONEXIÓN ( $\tau_{GS\_ON}=1,5\text{ ms}$ ) Y LA DESCONEXIÓN ( $\tau_{GS\_OFF}=4,6\text{ ms}$ ). CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA	

	( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL 2: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 3: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{\text{GS}}$ ). TENSIÓN DE BUS 100 V.....	266
FIGURA 6.18:	CONTROL ACTIVO CON DERIVADA DE CORRIENTE CON UNA CARGA DE 10 $\Omega$ Y 100 $\mu\text{F}$ . CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{\text{GS}}$ ). TENSIÓN DE BUS 100 V .....	268
FIGURA 6.19:	CONTROL ACTIVO CON DERIVADA DE CORRIENTE CON UNA CARGA DE 10 $\Omega$ Y 220 $\mu\text{F}$ (IZQUIERDA) Y DE 10 $\Omega$ Y 470 $\mu\text{F}$ (DERECHA). CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{\text{GS}}$ ). TENSIÓN DE BUS 100 V .....	269
FIGURA 6.20:	DETALLE DEL CIRCUITO DE CONTROL MEDIANTE CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE, REGULACIÓN CONMUTADA.....	271
FIGURA 6.21:	CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE CON UNA CARGA RESISTIVA PURA DE 5 $\Omega$ . CANAL 1: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{\text{GS}}$ ). TENSIÓN DE BUS 100 V .....	271
FIGURA 6.22:	CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE CON UNA CARGA DE 10 $\Omega$ Y 100 $\mu\text{F}$ . CANAL 1: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{\text{GS}}$ ). TENSIÓN DE BUS 100 V .....	272
FIGURA 6.23:	CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE CON UNA CARGA DE 10 $\Omega$ Y 220 $\mu\text{F}$ (IZQUIERDA) Y 10 $\Omega$ Y 470 $\mu\text{F}$ (DERECHA). CANAL 1: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{\text{GS}}$ ). TENSIÓN DE BUS 100 V .....	273
FIGURA 6.24:	CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE CON UNA CARGA DE 10 $\Omega$ Y 220 $\mu\text{F}$ . CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{\text{GS}}$ ). TENSIÓN DE BUS 100 V .....	273
FIGURA 6.25:	CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE CON UNA CARGA DE 5 $\Omega$ Y 220 $\mu\text{F}$ (IZQUIERDA) Y 5 $\Omega$ Y 470 $\mu\text{F}$ (DERECHA). CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{\text{GS}}$ ). TENSIÓN DE BUS 50 V .....	274
FIGURA 6.26:	CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE CON UNA CARGA DE 5 $\Omega$ Y 1800 $\mu\text{F}$ . CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{\text{GS}}$ ). TENSIÓN DE BUS 50 V .....	274

FIGURA 6.27: CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE CON CARGA DE $5\ \Omega$ Y $1800\ \mu\text{F}$ . CANAL 1: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 2: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 3: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL M: POTENCIA DISIPADA POR EL SSPC. TENSIÓN DE BUS $50\ \text{V}$ .....	276
FIGURA 6.28: DETALLE DEL CIRCUITO DE CONTROL MEDIANTE CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE.....	277
FIGURA 6.29: CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE CON UNA CARGA RESISTIVA DE $5\ \Omega$ Y CON CORRIENTE CONSTANTE DE $25\ \text{A}$ . CANAL 1: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{\text{GS}}$ ). TENSIÓN DE BUS $100\ \text{V}$ .....	278
FIGURA 6.30: CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE CON UNA CARGA DE $10\ \Omega$ Y $220\ \mu\text{F}$ Y CON CORRIENTE CONSTANTE DE $24\ \text{A}$ . CANAL 1: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{\text{GS}}$ ). TENSIÓN DE BUS $100\ \text{V}$ .....	278
FIGURA 6.31: CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE CON UNA CARGA DE $10\ \Omega$ Y $470\ \mu\text{F}$ Y CON CORRIENTE CONSTANTE DE $24,4\ \text{A}$ . CANAL 1: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR $V_{\text{GS}}$ . TENSIÓN DE BUS $100\ \text{V}$ .....	279
FIGURA 6.32: CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE CON UNA CARGA DE $10\ \Omega$ Y $2270\ \mu\text{F}$ Y CON CORRIENTE CONSTANTE DE $25\ \text{A}$ . CANAL 1: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR $V_{\text{GS}}$ . TENSIÓN DE BUS $100\ \text{V}$ .....	280
FIGURA 6.33: CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE CON UNA CARGA DE $5\ \Omega$ Y $1800\ \mu\text{F}$ Y CON CORRIENTE CONSTANTE DE $25\ \text{A}$ . CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR $V_{\text{GS}}$ . TENSIÓN DE BUS $50\ \text{V}$ .....	280
FIGURA 6.34: CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE CON UNA CARGA DE $5\ \Omega$ Y $3600\ \mu\text{F}$ Y CON CORRIENTE CONSTANTE DE $25\ \text{A}$ . CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 4: TENSIÓN DE ( $V_{\text{GS}}$ ). TENSIÓN DE BUS $50\ \text{V}$ .....	281
FIGURA 6.35: CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE CON UNA CARGA DE $5\ \Omega$ Y $5400\ \mu\text{F}$ Y CON CORRIENTE CONSTANTE DE $25\ \text{A}$ . CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{\text{GS}}$ ). TENSIÓN DE BUS $50\ \text{V}$ .....	281
FIGURA 6.36: CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE CON CARGA DE $5\ \Omega$ Y $1800\ \mu\text{F}$ . CANAL 1: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 2: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 3: TENSIÓN	

EN LA CARGA ( $V_{CARGA}$ ). CANAL M: POTENCIA DISIPADA POR EL SSPC. TENSIÓN DE BUS 50 V .....	283
FIGURA 6.37: DETALLE DEL CIRCUITO DE CONTROL MEDIANTE CONTROL ACTIVO GENERALIZADO .....	284
FIGURA 6.38: CONTROL ACTIVO GENERALIZADO CON UNA CARGA DE $10\ \Omega$ Y $220\ \mu F$ Y CON CORRIENTE MÁXIMA 20 A. CANAL 1: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{SSPC}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{CARGA}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{SSPC}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{GS}$ ). TENSIÓN DE BUS 100 V .....	285
FIGURA 6.39: CONTROL ACTIVO GENERALIZADO CON UNA CARGA DE $10\ \Omega$ Y $1800\ \mu F$ Y CON CORRIENTE MÁXIMA 27,6 A. CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{CARGA}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{SSPC}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{SSPC}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{GS}$ ). TENSIÓN DE BUS 100 V .....	286
FIGURA 6.40: CONTROL ACTIVO GENERALIZADO DE UNA CARGA DE $10\ \Omega$ Y $2270\ \mu F$ Y CON CORRIENTE MÁXIMA 27,6 A. CANAL 1: TENSIÓN EN EL SSPC. CANAL 2: TENSIÓN EN LA CARGA. CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC. CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{GS}$ ). TENSIÓN DE BUS 100 V .....	286
FIGURA 6.41: CONTROL ACTIVO GENERALIZADO CON UNA CARGA DE $5\ \Omega$ Y $3600\ \mu F$ (IZQUIERDA) Y UNA CARGA DE $5\ \Omega$ Y $5400\ \mu F$ (DERECHA) CON CORRIENTE MÁXIMA 27,6 A. CANAL 1: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{SSPC}$ ). CANAL 2: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{CARGA}$ ). CANAL 3: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{SSPC}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{GS}$ ). TENSIÓN DE BUS 50 V .....	287
FIGURA 6.42: CONTROL ACTIVO GENERALIZADO CON CARGA DE $5\ \Omega$ Y $5400\ \mu F$ . CANAL 1: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{SSPC}$ ). CANAL 2: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{SSPC}$ ). CANAL 3: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{CARGA}$ ). CANAL M: POTENCIA DISIPADA POR EL SSPC. TENSIÓN DE BUS 50 V .....	288
FIGURA 6.43: ÁREA DE OPERACIÓN SEGURA (SOA) DEL MOSFET, MODELO STY60NM50 .....	289
FIGURA 6.44: NIVELES DE SOA PROGRAMADA .....	290
FIGURA 6.45: DETALLE DEL DIAGRAMA DE CONTROL DEL SSPC PARA EL CONTROL ACTIVO POR TRAYECTORIA ÓPTIMA DE LA CORRIENTE .....	290
FIGURA 6.46: CONTROL ACTIVO POR TRAYECTORIA ÓPTIMA DE LA CORRIENTE CON CARGA DE $5\ \Omega$ . CANAL 1: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{SSPC}$ ). CANAL 2: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{SSPC}$ ). CANAL 3: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{CARGA}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{GS}$ ). TENSIÓN DE BUS 50 V .....	291
FIGURA 6.47: CONTROL ACTIVO POR TRAYECTORIA ÓPTIMA DE LA CORRIENTE CON CARGA DE $10\ \Omega$ Y $1800\ \mu F$ EN EL TIEMPO (IZQUIERDA) Y EN XY (CH1-CH2) (DERECHA). CANAL 1: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{SSPC}$ ). CANAL 2: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{SSPC}$ ). CANAL 3: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{CARGA}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{GS}$ ). TENSIÓN DE BUS 50 V .....	292

FIGURA 6.48: CONTROL ACTIVO POR TRAYECTORIA ÓPTIMA DE LA CORRIENTE CON CARGA DE $10\ \Omega$ Y $5400\ \mu\text{F}$ . CANAL 1: TENSIÓN EN EL SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 2: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). CANAL 3: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL 4: TENSIÓN EN LA PUERTA DEL SEMICONDUCTOR ( $V_{\text{GS}}$ ). CANAL M: POTENCIA DISIPADA POR EL SSPC. TENSIÓN DE BUS 50 V .....	293
FIGURA 6.49: REPRESENTACIÓN LINEAL DE LA CORRIENTE POR EL SSPC .....	293
FIGURA 6.50: CURVA $I^2T$ INCLUIDA EN EL SSPC FABRICADO POR SENSITRON® Y EN EL PROTOTIPO DESARROLLADO .....	295
FIGURA 6.51: MEDIDA REAL DE LA CORRIENTE Y DE LA SEÑAL DE CONTROL DEL SSPC DURANTE LA ACTIVACIÓN DE LA PROTECCIÓN $I^2T$ , PARA UN NIVEL DE CORRIENTE DE 12 A (IZQUIERDA) Y 20 A (DERECHA) .....	296
FIGURA 6.52: MEDIDA REAL DE LA CORRIENTE Y DE LA SEÑAL DE CONTROL DEL SSPC DURANTE LA ACTIVACIÓN DE LA PROTECCIÓN $I^2T$ , PARA UN NIVEL DE CORRIENTE DE 30 A (IZQUIERDA) Y 40 A (DERECHA) .....	296
FIGURA 6.53: COMPARATIVA DE LOS TIEMPOS DE ACTIVACIÓN DE LA PROTECCIÓN $I^2T$ EN SSPC Y CB .....	297
FIGURA 6.54: CARGA RESISTIVA PROGRAMABLE CONECTADA MEDIANTE UN SSPC SIN MEMORIA TÉRMICA	298
FIGURA 6.55: CARGA RESISTIVA PROGRAMABLE CONECTADA MEDIANTE UN SSPC CON MEMORIA TÉRMICA (30-70%) .....	299
FIGURA 6.56: CARGA RESISTIVA PROGRAMABLE CONECTADA MEDIANTE UN SSPC CON MEMORIA TÉRMICA (40-60%) .....	299
FIGURA 6.57: CARGA RESISTIVA PROGRAMABLE CONECTADA CON SSPC CON MEMORIA TÉRMICA, ENSAYOS DEL EFECTO DE LA DISIPACIÓN DEL CABLE.....	300
FIGURA 6.58: VALIDACIÓN DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL DE LA PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTE $I > 48\ \text{A}$ DEL SSPC CONTROLADA POR EL MICROCONTROLADOR. CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA ( $V_{\text{CARGA}}$ ). CANAL 2: CORRIENTE POR EL SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). .....	301
FIGURA 6.59: MODELO ESTRUCTURAL DEL PROTOTIPO .....	302
FIGURA 6.60: CONTROL PASIVO CON $R_{\text{GON}}=2,2\ \text{k}\Omega$ , $R_{\text{GOFF}}=6,8\ \text{k}\Omega$ Y $C_{\text{G}}=680\ \text{nF}$ Y CON CARGA RESISTIVA DE $5\ \Omega$ . CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA. CANAL 2: CORRIENTE POR EL SSPC. CANAL 3: TENSIÓN EN EL SSPC.....	303
FIGURA 6.61: RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DEL CONTROL PASIVO CON $R_{\text{GON}}=2,2\ \text{k}\Omega$ , $R_{\text{GOFF}}=6,8\ \text{k}\Omega$ Y $C_{\text{G}}=680\ \text{nF}$ Y CON CARGA RESISTIVA DE $5\ \Omega$ .....	304
FIGURA 6.62: CONTROL PASIVO CON $R_{\text{GON}}=2,2\ \text{k}\Omega$ , $R_{\text{GOFF}}=6,8\ \text{k}\Omega$ Y $C_{\text{G}}=680\ \text{nF}$ , DURANTE LA CONEXIÓN ( $\tau_{\text{GS\_ON}}=1,5\ \text{ms}$ ) Y LA DESCONEXIÓN ( $\tau_{\text{GS\_OFF}}=4,6\ \text{ms}$ ) DE UNA CARGA $5\ \Omega$ Y $100\ \mu\text{F}$ , A UN BUS DE 50 V. CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA. CANAL 2: CORRIENTE POR EL SSPC. CANAL 3: TENSIÓN EN EL SSPC.....	304



FIGURA 6.63: RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DEL SSPC CON CONTROL PASIVO CON $R_{GON}=2,2$ $k\Omega$ , $R_{GOFF}=6,8$ $k\Omega$ Y $C_G=680$ $nF$ ( $\tau_{GS\_ON}=0.680$ $ms$ ), DURANTE LA CONEXIÓN Y LA DESCONEXIÓN DE UNA CARGA CAPACITIVA DE $5$ $\Omega$ Y $100$ $\mu F$ .....	305
FIGURA 6.64: CONTROL PASIVO CON $R_{GON}=2,2$ $k\Omega$ , $R_{GOFF}=6,8$ $k\Omega$ , $C_G=680$ $nF$ DURANTE LA CONEXIÓN Y LA DESCONEXIÓN DE UNA CARGA CAPACITIVA $5$ $\Omega$ Y $47$ $\mu F$ , A UN BUS DE $50$ $V$ . CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA. CANAL 2: CORRIENTE POR EL SSPC. CANAL 3: TENSIÓN EN EL SSPC .....	305
FIGURA 6.65: RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO CON CONTROL PASIVO CON $R_{GON}=2,2$ $k\Omega$ , $R_{GOFF}=6,8$ $k\Omega$ , $C_G=680$ $nF$ DURANTE LA CONEXIÓN Y LA DESCONEXIÓN DE UNA CARGA CAPACITIVA DE $5$ $\Omega$ Y $47$ $\mu F$ .....	306
FIGURA 6.66: MODELO ESTRUCTURAL DEL PROTOTIPO CON CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE .....	307
FIGURA 6.67: MEDIDAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DEL SIMULACIÓN DEL MODELO DE CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE CON UNA CARGA DE $5$ $\Omega$ Y UNA CORRIENTE MÁXIMA PROGRAMADA DE $20$ $A$ .....	307
FIGURA 6.68: MEDIDAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE CON UNA CARGA DE $10$ $\Omega$ Y $220$ $\mu F$ , Y UNA CORRIENTE MÁXIMA PROGRAMADA DE $20$ $A$ .....	308
FIGURA 6.69: MEDIDAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE CON UNA CARGA DE $10$ $\Omega$ Y $470$ $\mu F$ , Y UNA CORRIENTE MÁXIMA PROGRAMADA DE $20$ $A$ .....	308
FIGURA 6.70: MODELO ESTRUCTURAL DEL PROTOTIPO CON CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE .....	309
FIGURA 6.71: MEDIDAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE, CON UNA CARGA DE $10$ $\Omega$ .....	310
FIGURA 6.72: MEDIDAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE, CON UNA CARGA DE $10$ $\Omega$ Y $220$ $\mu F$ .....	310
FIGURA 6.73: MEDIDAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE, EN LAZO CERRADO, CON UNA CARGA DE $10$ $\Omega$ Y $470$ $\mu F$ .....	311
FIGURA 6.74: MEDIDAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CONTROL ACTIVO GENERALIZADO CON UNA CARGA DE $10$ $\Omega$ Y $3600$ $\mu F$ , Y UNA CORRIENTE MÁXIMA DE $27,6$ $A$ .....	312
FIGURA 6.75: MEDIDAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CONTROL ACTIVO GENERALIZADO CON UNA CARGA DE $10$ $\Omega$ Y $5400$ $\mu F$ , Y UNA CORRIENTE MÁXIMA DE $27,6$ $A$ .....	312

FIGURA 6.76: MODELO ESTRUCTURAL DEL PROTOTIPO CON CONTROL ACTIVO POR TRAYECTORIA ÓPTIMA DE LA CORRIENTE.....	313
FIGURA 6.77: RESULTADOS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN CON EL MODELO DEL CONTROL ACTIVO POR CONTROL ACTIVO POR TRAYECTORIA ÓPTIMA DE LA CORRIENTE, CON CARGA RESISTIVA DE $5\ \Omega$ A UN BUS DE 50 V .....	314
FIGURA 6.78: RESULTADOS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN CON EL MODELO DEL CONTROL ACTIVO POR TRAYECTORIA ÓPTIMA DE LA CORRIENTE, CON UNA CARGA DE $5\ \Omega$ Y $470\ \mu\text{F}$ , CON UNA CORRIENTE MÁXIMA DE 28 A, EN BUS DE 50 V .....	314
FIGURA 6.79: RESULTADOS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN CON EL MODELO DEL CONTROL ACTIVO DE LA TRAYECTORIA ÓPTIMA DE LA CORRIENTE, CON UNA CARGA DE $5\ \Omega$ Y $1800\ \mu\text{F}$ , CON UNA CORRIENTE MÁXIMA DE 28 A, EN BUS DE 50 V .....	315
FIGURA 6.80: MODELO COMPORTAMENTAL DEL PROTOTIPO DE SSPC.....	316
FIGURA 6.81: MEDIDAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE CON UNA CARGA DE $5\ \Omega$ Y UNA CORRIENTE MÁXIMA PROGRAMADA DE 20 A .....	317
FIGURA 6.82: MEDIDAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE CON UNA CARGA DE $5\ \Omega$ Y $220\ \mu\text{F}$ Y UNA CORRIENTE MÁXIMA PROGRAMADA DE 20 A .....	317
FIGURA 6.83: MEDIDAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE CON UNA CARGA DE $5\ \Omega$ Y $470\ \mu\text{F}$ Y UNA CORRIENTE MÁXIMA PROGRAMADA DE 20 A .....	318
FIGURA 6.84: MEDIDAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE CON UNA CARGA DE $5\ \Omega$ .....	319
FIGURA 6.85: MEDIDAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE CON UNA CARGA DE $5\ \Omega$ Y $220\ \mu\text{F}$ .....	319
FIGURA 6.86: MEDIDAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE CON UNA CARGA DE $5\ \Omega$ Y $470\ \mu\text{F}$ .....	320
FIGURA 6.87: MEDIDAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CONTROL ACTIVO GENERALIZADO CON UNA CARGA DE $5\ \Omega$ Y $3600\ \mu\text{F}$ Y UNA CORRIENTE MÁXIMA DE 27,6 A ..	321
FIGURA 6.88: MEDIDAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CONTROL ACTIVO GENERALIZADO CON UNA CARGA DE $5\ \Omega$ Y $5400\ \mu\text{F}$ Y UNA CORRIENTE MÁXIMA DE 27,6 A ..	321
FIGURA 6.89: ÁREA DE OPERACIÓN SEGURA (SOA) DEL MOSFET, MODELO STY60NM50.....	322
FIGURA 6.90: ÁREA DE OPERACIÓN SEGURA (SOA) DEL IGBT, MODELO 50N60B2 .....	322
FIGURA 6.91: RESULTADOS DE LA CAÍDA DE TENSIÓN EN CONDUCCIÓN DEL MOSFET (IZQUIERDA) VS IGBT (DERECHA). CANAL 1: TENSIÓN EN LA CARGA. CANAL 2: CORRIENTE POR EL SSPC. CANAL 3: TENSIÓN EN EL SSPC. TENSIÓN DE BUS 100 V .....	323

FIGURA 6.92: RESULTADOS DE LA CONEXIÓN DE UNA CARGA ALTAMENTE CAPACITIVA DE $5\ \Omega$ Y $1800\ \mu\text{F}$ CON CONTROL DE LA TRAYECTORIA ÓPTIMA DE CORRIENTE EN AMBOS DISPOSITIVOS MOSFET (IZQUIERDA) VS IGBT (DERECHA). CANAL 1: TENSIÓN EN EL SSPC. CANAL 2: CORRIENTE POR EL SSPC. CANAL 3: TENSIÓN EN LA CARGA. CANAL 4: TENSIÓN DE CONTROL $V_{\text{GS}}$ . TENSIÓN DE BUS 50 V .....	323
FIGURA 6.93: RESULTADOS DE LA CONEXIÓN DE UNA CARGA ALTAMENTE CAPACITIVA $5\ \Omega$ Y $1800\ \mu\text{F}$ CON CONTROL DE LA TRAYECTORIA ÓPTIMA DE CORRIENTE EN AMBOS DISPOSITIVOS MOSFET (IZQUIERDA) VS IGBT (DERECHA). CANAL 1: TENSIÓN EN EL SSPC. CANAL 2: CORRIENTE POR EL SSPC. CANAL 3: TENSIÓN EN LA CARGA. CANAL M: POTENCIA DISIPADA POR EL SSPC. TENSIÓN DE BUS 50 V .....	324



# LISTADO DE TABLAS

<u>Título</u>	<u>Página</u>
TABLA 2.1: SISTEMAS DE GENERACIÓN DE POTENCIA EN AVIONES CIVILES Y MILITARES.....	31
TABLA 2.2: COMPARATIVA DE LOS NIVELES DE TENSIÓN EN GENERACIÓN.....	32
TABLA 2.3: COMPARATIVA EN FUNCIÓN DE LOS NIVELES DE TENSIÓN EN DISTRIBUCIÓN.....	35
TABLA 2.4: COMPARATIVA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE DE LAS BATERÍAS.....	39
TABLA 3.1: COMPARATIVA DE LAS POTENCIAS DISIPADAS POR LOS RELÉS, CB Y SSPC CON MISMAS CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	82
TABLA 3.2: COMPARATIVA DE LAS VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN.....	83
TABLA 4.1: ECUACIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL SSPC CON CONTROL PASIVO .....	137
TABLA 4.2: SIMULACIÓN DE LA ESTRATEGIA BASADA EN CONTROL ACTIVO MEDIANTE CORRIENTE CONSTANTE .....	144
TABLA 4.3: ECUACIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL SSPC CON CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE .....	146
TABLA 4.4: COMPARATIVA DEL ERROR COMETIDO EN LA EXPRESIÓN APROXIMADA QUE DEFINE LA CARGA EN LA RESISTENCIA.....	156
TABLA 4.5: COMPARATIVA DEL ERROR COMETIDO EN LA EXPRESIÓN DE CARGA ENTREGADA POR EL SSPC: EXPRESIÓN EXACTA (4.77) MÁS (4.79), FRENTE EXPRESIÓN APROXIMADA (4.82) .....	157
TABLA 4.6: SIMULACIÓN DE LA ESTRATEGIA BASADA EN CONTROL ACTIVO MEDIANTE DERIVADA DE CORRIENTE CONSTANTE.....	159
TABLA 4.7: ECUACIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL SSPC CON CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE .....	160
TABLA 4.8: SIMULACIÓN DEL CONTROL ACTIVO GENERALIZADO ( $T_s=0,5 T_C$ ; $T_M= 0,5 T_C$ ) .....	169
TABLA 4.9: SIMULACIÓN DEL CONTROL ACTIVO GENERALIZADO ( $T_s=0,25 T_C$ ; $T_M= 0,75 T_C$ ) .....	170
TABLA 4.10: SIMULACIÓN DEL CONTROL ACTIVO GENERALIZADO ( $T_s=0,75 T_C$ ; $T_M= 0,25 T_C$ ) .....	171
TABLA 4.11: ECUACIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL SSPC CON CONTROL ACTIVO GENERALIZADO .....	173
TABLA 4.12: CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN SEGURA DEL MOSFET, MODELO STY60NM50.....	176
TABLA 4.13: SIMULACIÓN DEL CONTROL ACTIVO CON CONTROL ÓPTIMO DE LA CORRIENTE .....	184
TABLA 4.14: COMPARATIVA DE LOS PROCEDIMIENTOS DE CONEXIÓN CON CONTROL ACTIVO E IGUAL TIEMPO DE CONEXIÓN, LIMITADO POR LA SOA .....	187
TABLA 4.15: COMPARATIVA DE LAS ECUACIONES DE CÁLCULO DE LA CAPACIDAD MÁXIMA .....	188

TABLA 5.1 COMPARATIVA ENTRE MODELOS COMPORTAMENTALES Y MODELOS ESTRUCTURALES.....	230
TABLA 5.2: CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LOS SSPC .....	232
TABLA 6.1: ESPECIFICACIÓN DE CONEXIÓN DEL CONTROL PASIVO .....	262
TABLA 6.2: MEDIDAS EXPERIMENTALES VS CÁLCULOS TEÓRICOS DEL CONTROL PASIVO .....	265
TABLA 6.3: PARÁMETROS INTERNOS DE CONFIGURACIÓN DEL SSPC, DE LA CARGA Y LA DESCARGA DE CG CON CONTROL ACTIVO .....	266
TABLA 6.4: ESPECIFICACIÓN DE CONEXIÓN DEL SSPC CON CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE .....	267
TABLA 6.5: MEDIDAS EXPERIMENTALES DEL CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE (REGULACIÓN LINEAL) VS RESULTADOS TEÓRICOS .....	270
TABLA 6.6: MEDIDAS EXPERIMENTALES VS RESULTADOS TEÓRICOS DEL CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE (REGULACIÓN CONMUTADA) .....	275
TABLA 6.7: ESPECIFICACIONES DE CONEXIÓN DEL SSPC CON CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE .....	277
TABLA 6.8: MEDIDAS EXPERIMENTALES VS RESULTADOS TEÓRICOS DEL CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE .....	282
TABLA 6.9: ESPECIFICACIONES DE CONEXIÓN DEL SSPC CON CONTROL ACTIVO GENERALIZADO.....	284
TABLA 6.10: MEDIDAS EXPERIMENTALES VS RESULTADOS TEÓRICOS DEL CONTROL ACTIVO GENERALIZADO .....	288
TABLA 6.11: ESPECIFICACIONES DE CONEXIÓN DEL SSPC CON CONTROL ACTIVO POR TRAYECTORIA ÓPTIMA DE LA CORRIENTE .....	291
TABLA 6.12: MEDIDAS EXPERIMENTALES VS RESULTADOS TEÓRICOS DEL CONTROL ACTIVO POR TRAYECTORIA OPTIMA DE LA CORRIENTE .....	294
TABLA 6.13: TIEMPOS DE ACTIVACIÓN DE LA CURVA $I^2_T$ .....	297

# Capítulo 1

## **1. INTRODUCCIÓN, MOTIVACIÓN Y PLANTEAMIENTO DE LA TESIS**





ÍNDICE CAPÍTULO 1

---

1.1	INTRODUCCIÓN .....	5
1.2	MOTIVACIÓN.....	9
1.3	OBJETIVOS .....	10
1.4	ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	12
1.5	REFERENCIAS .....	15



## **1.1 Introducción**

En los nuevos diseños de aviones civiles y militares existe una notable tendencia hacia el incremento de la demanda de potencia eléctrica. Esto es debido principalmente a la sustitución de los tradicionales sistemas mecánicos, neumáticos e hidráulicos por sistemas parcial o totalmente eléctricos, por lo que en los nuevos diseños de avión se utilizan: actuadores electromecánicos ó electrohidráulicos. Sumado a lo anterior, existe un continuo incremento en el número de equipos consumidores de potencia eléctrica dentro de los diferentes sistemas: comunicaciones, aviónica, vigilancia, etc., como pueden ser: cámaras infrarrojas, radios, radar, actuadores y computadores de control. Para hacer frente a este incremento de la demanda de potencia eléctrica, se empiezan a utilizar nuevos niveles de tensión y nuevas arquitecturas aplicadas dentro de los sistemas de distribución de potencia eléctrica embarcados. Como resultado de todos estos avances se crea el concepto de avión más eléctrico ó totalmente eléctrico, el cual presenta una serie de ventajas o mejoras frente a los aviones convencionales, que se enumeran a continuación [Emadi00] [Quigley93] [Spitzer84]:

- Una reducción en el peso relativo de los equipos y componentes.
- Simplificación en el mantenimiento de la aeronave.
- Reducción en el consumo de combustible.
- Una mayor tolerancia a los fallos del sistema de distribución eléctrico.
- Un mejor control y monitorización del sistema de distribución eléctrico.
- Disminución de los equipos de soporte en tierra.
- Reducción de los niveles de ruido.
- Sin olvidarnos del menor impacto medioambiental, que son consecuencia directa de los puntos anteriores.

Como se ha indicado, esta nueva tipología de avión cada vez presenta más equipos dependientes de la potencia eléctrica, que forman parte de los diferentes sistemas del avión. Este aumento en el número de equipos que demandan energía eléctrica ha

provocado, que los tradicionales niveles de tensión de  $28V_{CC}$  y  $115V_{CA}$  hayan evolucionado hacia niveles de  $270 V_{CC}$  normalmente para aplicaciones militares; y tensiones de  $\pm 270 V_{CC}$  ó  $230 V_{CA}$  para aplicaciones civiles [Moir09]. Una de las ventajas que se consiguen con estos nuevos niveles de tensión, es la reducción de los niveles de corriente en comparación con los tradicionales sistemas a más baja tensión; un sistema a  $28 V_{CC}$  no es conveniente que maneje corrientes superiores a 400 Amperios. Como consecuencia de la disminución de la corriente se puede disminuir la sección de los cables y por lo tanto el volumen y el peso del cableado asociado a los sistemas de distribución de potencia eléctrica (SDPE). No obstante, al elevar el nivel de tensión se plantean algunos problemas de funcionamiento en algunos dispositivos, como pueden ser en las protecciones usadas hasta hoy en día. También se producen otros inconvenientes originados por los efectos físicos en los cables, debido a los nuevos niveles de tensión: efecto corona, fallo por arco, etc., que deben ser evitados en los nuevos sistemas eléctricos [Cotton08].

Por otro lado, es importante indicar, que en estas nuevas arquitecturas eléctricas, tienen que convivir los nuevos niveles de tensión, con los niveles de tensión convencionales. Esto es consecuencia de la existencia de multitud de equipos instalados en los aviones ya existentes. Estos equipos tienen que ser conectados a estas nuevas arquitecturas, y por tanto se debe mantener los niveles convencionales de tensión. Como resultado se plantean arquitecturas en las que existen distintos niveles de tensión que requieren cada vez más de equipos de conversión [Moir08]. Todo esto supone un mayor grado de complejidad para las nuevas arquitecturas de distribución eléctrica.

Recientes avances en áreas como la electrónica de potencia y el campo de los microprocesadores, han proporcionado las herramientas necesarias para el desarrollo de estas nuevas arquitecturas de distribución de potencia eléctrica embarcadas. De este modo, los aviones más eléctricos requirieron de un mayor número de convertidores (CC/CC), rectificadores (CA/CC), inversores (CC/CA), protecciones basadas en controladores de potencia de estado sólido, etc. Estos elementos son equipos electrónicos, que permiten hacer frente a las necesidades planteadas en las nuevas arquitecturas de los

SDPE [Kankam02]. De este modo, en los nuevos sistemas de distribución de potencia eléctrica los equipos basados en electrónica de potencia juegan un papel fundamental, ya que cada vatio es procesado del orden de hasta tres veces por elementos constituidos por esta tecnología, antes de ser utilizados en los equipos consumidores. Este es un dato importante, que se debe de tener en cuenta a la hora de diseñar los equipos y sistemas que formen parte de estas nuevas arquitecturas [Weimer02].

Uno de los componentes claves que van a formar parte de los nuevos sistemas, como elemento de protección del cableado y control de las cargas eléctricas, es el controlador de potencia de estado sólido, dispositivo que será denominado en lo sucesivo por sus siglas en inglés SSPC (*solid state power controller*). El SSPC, sobre el que se centrará esta tesis doctoral, sustituye a las protecciones convencionales, como son los circuitos magnetotérmicos y a los elementos encargados de conmutar cargas, como son los relés, los cuales presentan problemas de funcionamiento en los nuevos SDPE debido principalmente a los cambios en los niveles de tensión. Así mismo, el SSPC tiene la capacidad de proteger al cableado y de realizar la conexión/desconexión de las cargas de un modo controlado. Además, este dispositivo presenta innumerables ventajas en comparación con los elementos mecánicos anteriormente mencionados, como pueden ser, menor peso, mayor fiabilidad, mejor monitorización, mejor control, etc. Gracias a esta funcionalidad añadida, el uso de estos dispositivos se está generalizando en las aplicaciones aeroespaciales y aeronáuticas, dentro de los sistemas de distribución de potencia embarcados [Izquierdo08].

Teniendo en cuenta la complejidad de los nuevos SDPE embarcados, los modelos de los SSPC juegan un papel fundamental a la hora reproducir el funcionamiento de los componentes, mejorar su funcionalidad y de predecir posibles problemas de funcionamiento dentro de las nuevas arquitecturas. Uno de los problemas que presentan estos componentes está asociado a la conexión de determinadas cargas, como por ejemplo las cargas muy capacitivas. Otro de los problemas, es la aparición de interacciones entre los SSPC y los diferentes elementos, a los cuales se conectan, dentro de las nuevas arquitecturas embarcadas.

No obstante los fabricantes de SSPC no proporcionan modelos de los dispositivos que permitan validar la funcionalidad con el resto del sistema. Así pues, es necesario el estudio y el desarrollo de modelos que reproduzcan el comportamiento de los nuevos componentes, como son los controladores de potencia que componen los SDPE.

## **1.2 Motivación**

Las principales motivaciones que han promovido este trabajo de tesis doctoral son las siguientes:

- Resolver la problemática asociada a la conexión y desconexión de cargas en los nuevos sistemas de distribución de potencia eléctrica, originados por el incremento de los niveles de tensión. Resolver en especial la conexión de cargas altamente capacitivas.
- Desarrollar modelos que permitan dar soporte durante las fases de diseño, desarrollo e integración de los SSPC en las nuevas arquitecturas de distribución de potencia embarcadas.
- Desarrollar un prototipo de SSPC que permita validar las distintas estrategias de conexión de cargas altamente capacitivas, los modelos y las nuevas funcionalidades, presentadas a lo largo de este trabajo.
- Abrir nuevas líneas de investigación dentro del Grupo de Sistemas Electrónicos de Potencia de la Universidad Carlos III de Madrid; así como profundizar en la problemática asociada a los nuevos componentes del avión más eléctrico.
- Transferir al sector aeronáutico la investigación y desarrollos tecnológicos generados, a través de proyectos de colaboración con empresas del sector, como EADS.

### 1.3 Objetivos

El objetivo planteado en la tesis es, por un lado, definir y analizar nuevas estrategias que permitan al SSPC conmutar cargas muy capacitivas; en segundo lugar, desarrollar modelos que permitan validar el comportamiento de los SSPC en las diferentes fases del proceso de diseño e instalación dentro del SDPE; y finalmente, implementar un prototipo que permita validar las nuevas funcionalidades y los modelados presentados.

A continuación, se detallan los principales objetivos del trabajo de investigación:

- La definición, análisis e implementación de estrategias de conexión, que mejoren la funcionalidad del SSPC durante los transitorios de conexión de cargas altamente capacitivas, para solucionar las problemáticas que presentan los SSPC comerciales que existen actualmente.
- La realización del modelado estructural de un controlador de potencia de estado sólido que facilite el desarrollo de un prototipo de SSPC, de forma que permita anticipar problemas futuros e implementar soluciones previo a su montaje final. En este modelo estructural se pretenden introducir algunas capacidades como la memoria térmica del SSPC y la compensación por temperatura originada por la disipación térmica de los cables.
- El desarrollo de un modelo comportamental genérico de SSPC, que incluya todos los parámetros de los componentes reales y que permita con un número mínimo de ajustes reproducir el funcionamiento de SSPC de distintos fabricantes. Además, este modelo debe permitir ser ajustado de acuerdo con las hojas de características de diferentes fabricantes ( $I^2t$ , protección instantánea frente a sobrecorriente o cortocircuito, etc.), con el objetivo de poder analizar situaciones de funcionamiento real en un entorno simulado. Por otro lado, este modelo debe permitir validar la funcionalidad del sistema completo basado en módulos de SSPC, para su aplicación en los nuevos SDPE. Otro de los objetivos, dentro de este trabajo de investigación, es la validación experimental del modelo comportamental genérico con varios SSPC comerciales, proporcionado por



fabricantes internacionales del sector de los semiconductores y otras empresas del sector aeroespacial.

- El desarrollo de un prototipo de SSPC donde validará las diferentes estrategias de conexión de cargas altamente capacitivas y se implementarán mecanismos de protecciones como la curva  $I^2t$  y la protección contra sobrecorriente. El control interno del SSPC se realizará mediante un microcontrolador, en este caso el 80C51. Por otro lado, se validaran diferentes tecnologías de semiconductores como son: IGBT y MOSFET. Finalmente, se realizara la validación del modelado estructural y comportamental con el prototipo de SSPC desarrollado, con diferentes cargas capacitivas y con las distintas estrategias de conexión de cargas.

## **1.4 Estructura de la tesis**

El documento de la tesis se ha dividido en ocho capítulos que se resumen en los siguientes párrafos.

**Capítulo 1.** En el primer capítulo se resumen los intereses que motivaron la realización de la tesis y los objetivos que se persiguen con el desarrollo de este trabajo de investigación. Además, se presenta la estructura del documento.

**Capítulo 2.** En este segundo capítulo se presentan los diferentes sistemas de distribución de potencia eléctrica embarcados, existentes en la actualidad en el campo civil y militar. Además, se describe su funcionamiento a alto nivel y se comparan las similitudes que presentan unos sistemas con otros. También, se identifican la funcionalidad de cada uno de los diferentes equipos que componen los SDPE, como pueden ser los convertidores CC/CC, inversores (CC/CA), baterías, etc. En dicho capítulo, además, se enumeran cada uno de los componentes que componen estos sistemas de distribución de potencia eléctrica, prestando especial interés a los elementos encargados de proteger el sistema eléctrico. Finalmente, se presenta la tendencia de los sistemas de distribución de potencia en los nuevos desarrollos de aviones y proyectos tecnológicos, en el campo civil y militar.

**Capítulo 3.** En el tercer capítulo se describen los diferentes dispositivos de protección en los sistemas convencionales y el papel del controlador de potencia de estado sólido (SSPC), en los nuevos sistemas de distribución de potencia eléctrica. En este capítulo se describen las ventajas e inconvenientes de estos dispositivos frente a los dispositivos convencionales, se identifican las funcionalidades que ofrece este dispositivo basado en componentes electrónicos, y se analiza la estructura interna del componente. Además, se describe la funcionalidad y mejoras que introduce la utilización de este componente dentro de un sistema de distribución de potencia eléctrica, en comparación con los sistemas de protección y conexión de cargas en las redes de avión convencionales. Por otro lado, se identifican varios fabricantes de SSPC, y se analizan las limitaciones y problemas de funcionamiento que puede presentar este componente. Finalmente, se hace hincapié en uno de los principales problemas que presenta los SSPC y que se relaciona con es la conexión de cargas altamente capacitivas.

**Capítulo 4.** En este capítulo se presentan diferentes estrategias de control de conexión de cargas altamente capacitivas y las ecuaciones que describen el comportamiento de la tensión y corriente por el SSPC. Estas estrategias están especialmente diseñadas para mejorar los transitorios de conexión de una carga altamente capacitiva mediante un SSPC, limitando el nivel de corriente máxima, de forma que se realiza una conexión suave y se evita daños sobre el SSPC. Cabría destacar un procedimiento de conexión que permite optimizar la zona de operación segura del semiconductor, reduciendo los tiempos de conexión de las cargas muy capacitivas, de acuerdo con los límites de funcionamiento del semiconductor. Algunas de las estrategias pueden ser implementadas mediante componentes pasivos, resistencias o condensadores, y otras mediante el uso de circuitos activos más complejos dependientes de componentes activos, como pueden ser transistores, operacionales, reguladores o microprocesadores.

**Capítulo 5.** Se proponen dos métodos de modelado del controlador de potencia de estado sólido, uno basado en la estructura interna del componente, modelado estructural, y un segundo modelo basado en las hojas de características del fabricante y medidas experimentales, modelado comportamental. Se comparan los diferentes modelos y se validan con componentes comerciales y en desarrollo. Dentro de los dos tipos de modelado señalar que el modelado estructural se utilizará dentro de la fases de diseño y desarrollo de los dispositivos, y el modelo comportamental es aplicable a nivel de sistema, dentro de los SDPE completos, durante las fases de integración, simulación y ensayos.

**Capítulo 6.** Se presenta el diseño y desarrollo de un prototipo o plataforma de pruebas de un SSPC, prestando especial atención a las diferentes partes que forman el dispositivo: bloque encargado de la medida de corriente, bloque de muestreo de la tensión, driver de control, sistema de alimentación interno y el bloque de control activo. Mediante este prototipo de SSPC es posible validar las distintas estrategias de conexión de cargas muy capacitivas presentadas durante el capítulo cuatro. Además, la plataforma presentada permite validar otras tecnologías de semiconductores como IGBT frente a tecnología MOSFET. Además, se muestra la validación experimental del modelo estructural y del modelo comportamental de SSPC presentados en el capítulo 5.

**Capítulo 7.** En el capítulo séptimo se enumeran las principales aportaciones y conclusiones obtenidas a partir del trabajo de investigación realizado. Entre las que se puede destacar las distintas estrategias de control de la corriente durante la conexión a cargas altamente capacitivas, el modelo estructural y el modelo comportamental presentados. Además, se exponen las posibles líneas de trabajos futuros que se derivan de este trabajo de investigación.

**Capítulo 8.** En el capítulo octavo se citan los proyectos tecnológicos, patentes y publicaciones, cuya temática está directamente relacionada y son fruto de este trabajo de tesis doctoral, y dentro de los cuales se han aplicado los resultados.

## 1.5 Referencias

- [Emadi00] Emadi, K.; Ehsani, M.; "Aircraft power systems: technology, state of the art, and future trends". Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE Volume 15, Issue 1, Jan. 2000. Page(s): 28 - 32.
- [Izquierdo08] D. Izquierdo, A. Barrado, C. Raga, M. Sanz, P. Zumel, A. Lázaro. "Protection devices for aircraft electrical power distribution systems: a Survey" Industrial Electronics Society, 2008. IECON 2008. 35th Annual Conference of IEEE. Orlando November 11-13, 2008.
- [Kankam02] M. David Kankam "A survey of Power Electronics applications in Aerospace Technologies". 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference cosponsored by the ASME, IEEE, AIChE, ANS, SAE, and AIAA Savannah, Georgia, July 29–August 2, 2001.
- [Moir08] Moir, Ian; Seabridge, Allan. "Aircraft Systems: Mechanical, Electrical and Avionics Subsystems Integration". 3rd ed. Chichester (West Sussex): Wiley, 2008. 546 p. Aerospace Series. ISBN: 978-0-470-05996-8.
- [Quigley93] Quigley, R.E.J.; "More Electric Aircraft". Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1993. APEC '93. Conference Proceedings 1993, Eighth Annual. 7-11 March 1993 Page(s):906 - 911.
- [Spitzer84] Spitzer, C.R."The All-Electric Aircraft: A Systems View and Proposed NASA Research Programs" NASA Langley Research Center. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions. Volume AES-20, Issue 3. May 1984. Page(s): 261-266.
- [Weimer02] J. Weimer; "Power Electronics in the More Electric Aircraft" 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 14-17 January 2002 / Reno, Nevada. AIAA. 2002-0727.



# Capítulo 2

## **2. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA EMBARCADOS**





ÍNDICE CAPÍTULO 2

---

2.1	INTRODUCCIÓN .....	21
2.2	DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS .....	22
2.2.1	<i>Sistemas de Generación</i> .....	25
2.2.1.1	Sistemas de generación en corriente continua (CC) .....	26
2.2.1.2	Sistemas de generación de corriente alterna (CA) .....	28
2.2.1.3	Comparativa de los sistemas en CA y CC de generación existentes .....	30
2.2.2	<i>Subsistema de Distribución Primaria</i> .....	32
2.2.2.1	Comparativa de los sistemas de distribución en CA y CC .....	35
2.2.3	<i>Área de Conversión</i> .....	36
2.2.4	<i>Sistemas de baterías</i> .....	38
2.2.5	<i>Distribución secundaria</i> .....	40
2.2.6	<i>Control del sistema eléctrico</i> .....	41
2.3	CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA EMBARCADOS .....	44
2.3.1	<i>Sistemas eléctricos en aviones civiles convencionales</i> .....	44
2.3.1.1	Boeing .....	44
2.3.1.2	Airbus .....	45
2.3.2	<i>Sistemas eléctricos en aviones militares convencionales</i> .....	46
2.3.3	<i>Nuevos sistemas eléctricos</i> .....	49
2.3.3.1	Aviones civiles .....	51
2.3.3.2	Aviones militares .....	54
2.4	INICIATIVAS TECNOLÓGICAS .....	57
2.4.1	POA .....	58
2.4.2	MOET.....	58
2.4.3	<i>Joint Technology Initiative Clean Sky</i> .....	60
2.4.4	HV270DC.....	62
2.4.5	MADMEL .....	63
2.4.6	<i>Otros demostradores</i> .....	63
2.5	REFERENCIAS .....	65



## **2.1 Introducción**

El objetivo de este capítulo es describir los sistemas eléctricos de avión desde el punto de vista de los equipos que lo constituyen. Además, se mostrarán las diferentes configuraciones ó arquitecturas actuales que pueden adoptar los sistemas de distribución de potencia eléctrica (SDPE) embarcados en aviones civiles y militares, así como las nuevas tendencias.

En primer lugar se describen los diferentes subsistemas que componen los SDPE de un avión incluyendo: área de generación, distribución primaria, conversión, almacenamiento, distribución secundaria y control. Además, se incluye una descripción de los equipos que forman parte de estos subsistemas.

En segundo lugar se presentan las diferentes arquitecturas de los sistemas eléctricos de aviones convencionales, dentro del campo de aplicación civil y militar. También, se recogen algunas de las arquitecturas de los SDPE de los últimos aviones desarrollados en ambos campos.

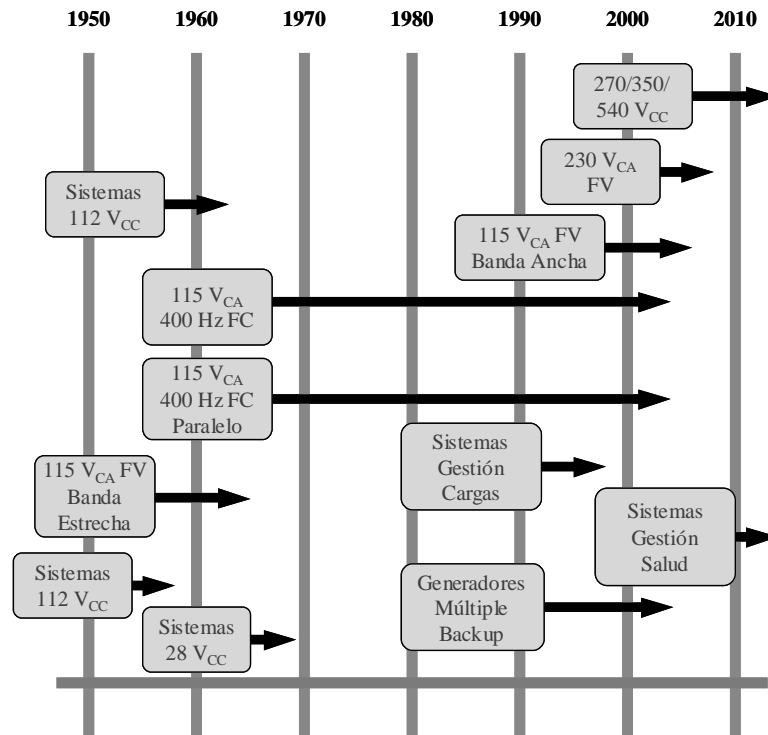
En el último apartado del capítulo, se recogen las principales tendencias de los SDPE embarcados en el sector de la aviación comercial y militar, y se muestra su evolución en comparación con los sistemas eléctricos convencionales. Finalmente, se presentan algunas de las iniciativas tecnológicas aparecidas durante los últimos años, como respuesta a los nuevos requisitos eléctricos dentro del concepto del avión más eléctrico o totalmente eléctrico.

## **2.2 Descripción de los sistemas eléctricos**

Cada vez más los sistemas embarcados en avión son más complejos y sofisticados, debido principalmente a las nuevas funcionalidades y a los avances tecnológicos introducidos. Un ejemplo claro de la evolución de los sistemas embarcados es el caso del sistema eléctrico. En los primeros años de la aviación, la única utilidad de la electricidad en un avión era la de encender la mezcla de combustible mediante un generador eléctrico especial, actualmente en desuso, que se denominaba “magneto”. Sin embargo, rápidamente se hizo necesario un equipo de radio a bordo, el cual requería alimentación eléctrica que inicialmente fue proporcionada mediante una batería de acumuladores. A partir de ese momento, se consideró las múltiples ventajas de disponer de una fuente de alimentación eléctrica de mayor autonomía y más versátil que la batería. De este modo, primero se introdujeron los generadores movidos por aire, y más tarde por motivos de fiabilidad se introdujeron las dinamos. Estos dos hitos desencadenaron la utilización masiva de los sistemas eléctricos en los aviones tal y como hoy se conocen [Moir08] [Plaza00].

Los primeros sistemas eléctricos embarcados estaban basados en niveles de tensión de corriente continua de 12 V<sub>CC</sub> que más tarde evolucionaron hasta los 24 V<sub>CC</sub> mediante la conexión de baterías en serie, para llegar finalmente hasta los 28 V<sub>CC</sub>. Este último nivel de tensión todavía se mantiene hoy día como estándar en gran parte de los aviones. Con el incremento de las necesidades de energía eléctrica en los aviones aumentaron las ventajas del empleo de corriente alterna frente a SDPE en corriente continua, desembocando en el uso de tensiones de 115 V<sub>CA</sub>, ampliamente extendido en la actualidad, primero a frecuencia constante (FC) y posteriormente a frecuencia variable (FV). Sin embargo, los sistemas eléctricos actuales cada vez más proporcionan energía a numerosos y sofisticados equipos y subsistemas. Este aumento en las necesidades de potencia eléctrica embarcada no ha cesado y requiere del estudio de alternativas viables, a los sistemas eléctricos convencionales que se han venido empleando a lo largo de los últimos años. Como consecuencia han aparecido sistemas embarcados que presentan tensiones de 230 V<sub>CA</sub> y  $\pm 270$  V<sub>CC</sub> en aplicaciones civiles ó 270 V<sub>CC</sub> en aplicaciones militares. Otros

conceptos asociados a los nuevos SDPE son: la gestión de cargas inteligente, la utilización de generadores de reserva y sistemas de monitorización del estado de equipos/componentes. Estos sistemas de distribución de potencia eléctrica requieren de nuevos equipos y componentes, que permitan hacer frente al nuevo salto tecnológico que suponen todos estos cambios, ver Figura 2.1.

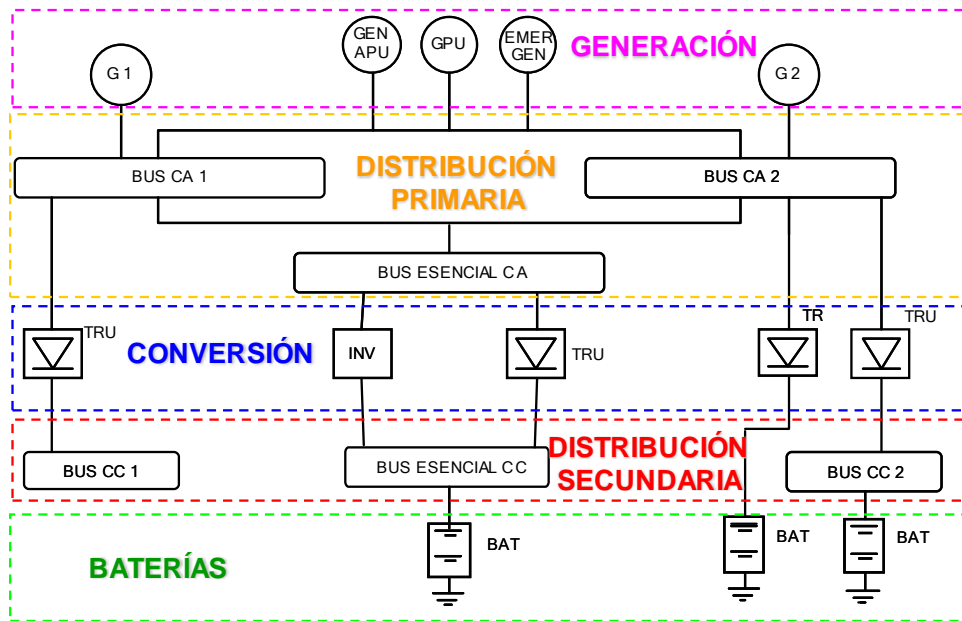


**Figura 2.1: Evolución de los sistemas eléctricos embarcados**

El sistema eléctrico de un avión generalmente está dividido en los siguientes subsistemas: generación, distribución primaria, conversión, baterías, distribución secundaria y el área de control, ver Figura 2.2 [Moir08] [Plaza00] [Pallet87] [Bygate90].

El sistema de **generación eléctrica** es el encargado de generar la potencia eléctrica que requieren los diferentes sistemas integrados dentro del avión, en condiciones normales ó de emergencia. Además, debe de mantener los niveles, dentro de unos márgenes adecuados, en los valores definidos en las normativas y estándares [MS704] [RD160].

El bloque de **distribución primaria** se encarga de la unión física entre el bloque de generación y el resto del sistema eléctrico incluyendo algunas cargas eléctricas. Incluye la red encargada de la distribución, los elementos de conmutación de las cargas y las protecciones a nivel primario.



**Figura 2.2: Esquema eléctrico simplificado A-330**

En los sistemas eléctricos de las aeronaves se emplean multitud de equipos, algunos de los cuales pueden necesitar alimentaciones diferentes de las tensiones nominales proporcionadas por los generadores principales. Para cubrir estas necesidades se dispone de una serie de equipos de **conversión** de energía, encargados de proporcionar los niveles de tensión, requeridos por los equipos consumidores de potencia eléctrica instalados en el avión, a partir de los niveles tensión presentes en el sistema de distribución primaria.

Aunque inicialmente las **baterías** fueron el primer elemento introducido en los sistemas eléctricos de los aviones, actualmente su uso está ligado a motivos de seguridad. De este modo, el sistema dispone de baterías que permiten almacenar energía para asegurar el suministro continuo, tanto en caso de funcionamiento normal del sistema, como en situaciones de emergencia donde han fallado las fuentes de generación principales.

Uno de los elementos que más ha evolucionado en los últimos años en los sistemas eléctricos, es la parte correspondiente con el subsistema de **distribución secundaria**, con la introducción de nuevos sistemas basados en tecnología de estado sólido, como los controladores de potencia de estado sólido (SSPC). Esta área está constituida por los dispositivos de protección, elementos de conexión o desconexión de las cargas y el cableado hasta las cargas.

Finalmente, se debe considerar la parte del sistema que realiza las funciones de control. Todos los sistemas descritos anteriormente requieren de algún tipo de control individual o general que asegure el correcto, eficaz y eficiente funcionamiento del sistema. En los aviones convencionales, la función de **control y monitorización** del funcionamiento del sistema eléctrico se efectúa principalmente por medio de interruptores, indicadores luminosos y relés. En las nuevas plataformas, gracias a los equipos electrónicos, se introducen nuevos conceptos de control y monitorización del sistema.

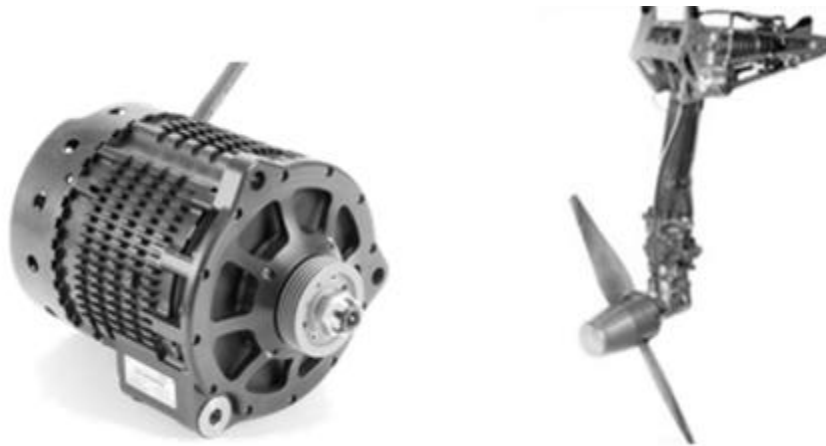
En estos últimos años, en todos estos subsistemas se han introducido nuevos equipos y dispositivos, en los que la electrónica juega un papel fundamental, y los cuales permiten el control, protección y manejo del sistema eléctrico de forma más autónoma y eficiente, con las ventajas operativas que esto supone. En los siguientes párrafos se describen los subsistemas y equipos que constituye el sistema eléctrico.

### 2.2.1 Sistemas de Generación

Los sistemas de generación pueden ser de corriente continua (CC) ó corriente alterna (CA) dependiendo del nivel de potencia eléctrico requerido por la aeronave. Los generadores son máquinas eléctricas rotatorias que suministran potencia eléctrica cuando se les proporciona potencia mecánica en su eje. La potencia mecánica se puede obtener directamente desde los motores del avión, el motor de la unidad de potencia auxiliar, APU (*auxiliary power unit*), u otras fuentes alternativas de emergencia como puede ser la turbina empleada durante situaciones de emergencia, comúnmente conocida como la turbina de aire en emergencia, RAT (*ram air turbine*). Entre las fuentes de energía mecánica y los generadores eléctricos ha de existir una adecuada interfaz mecánica que

permita la transmisión entre la caja de engranajes y el generador, soportando el peso del mismo y proporcionando además información sobre la cantidad de potencia mecánica transmitida. De este modo, un avión puede obtener la potencia eléctrica desde: el generador principal, generador de emergencia, generador unido a la APU y el generador unido al eje de la RAT cuando es desplegada. También es posible obtener potencia eléctrica, durante las operaciones en tierra, a partir de un equipo externo como la unidad de potencia de tierra, GPU (*ground power unit*). La GPU se interconecta directamente al sistema eléctrico de la aeronave, lo que permite energizar completamente el sistema eléctrico, sin necesidad de encender los motores.

En todo momento las fuentes de generación presentes en la aeronave deben de ser capaces de proporcionar la cantidad apropiada de energía eléctrica necesaria a las cargas. Por otro lado, debe de mostrar información sobre el propio estado de funcionamiento tanto a la tripulación como al personal de mantenimiento, a través de la unidad de control del generador, GCU (*generator control unit*).



**Figura 2.3: Generador de CC (izquierda) y RAT de avión (derecha)**

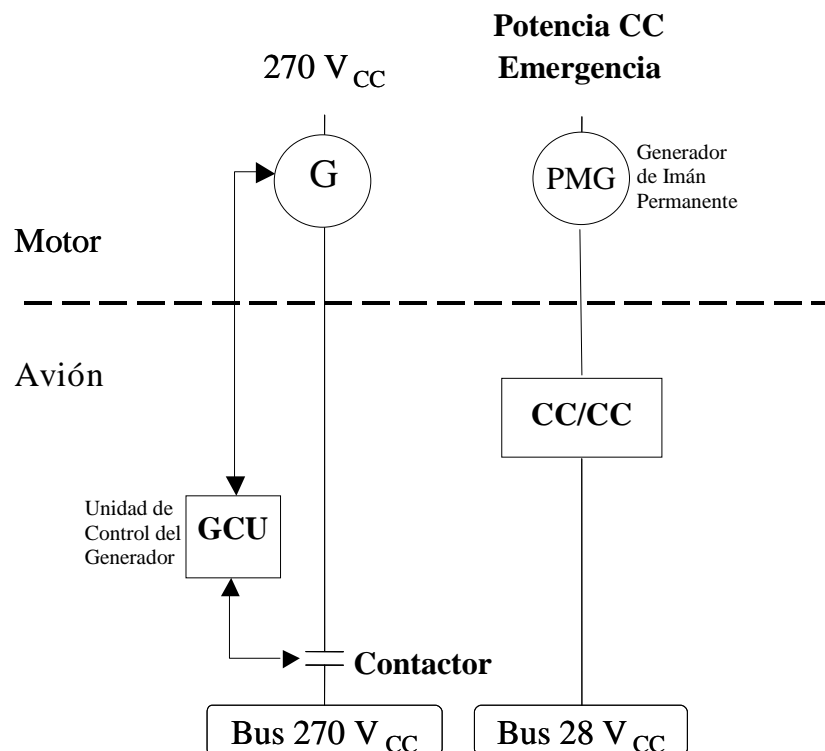
#### 2.2.1.1 Sistemas de generación en corriente continua (CC)

Hasta no hace mucho, los sistemas de generación en corriente continua solían estar dedicados a sistemas de limitada potencia en pequeñas aeronaves o como soporte a los sistemas de generación en CA, como son los sistemas de emergencia. En la actualidad se



empiezan a introducir para proporcionar potencia eléctrica para toda la aeronave, incluso en SDPE con elevada demanda.

Los generadores de corriente continua están regulados para proporcionar una tensión continua constante a las cargas controlando las posibles fluctuaciones, ya sea en  $28 V_{CC}$  ó  $270 V_{CC}$ . Se trata de generadores auto-excitados que contienen un electro-imán giratorio a partir del cual se obtiene una onda sinusoidal. Esta onda gracias a elementos conmutadores se rectifica y posteriormente se filtra para estabilizarse en un nivel de continua constante, ver Figura 2.4.



**Figura 2.4: Modos de generación de potencia eléctrica en CC**

Para generar potencia eléctrica de emergencia de  $28 V_{CC}$  en sistemas de alta fiabilidad se puede emplear un generador de imán permanente, PMG (*permanent magnet generator*) y los dispositivos de conversión adecuados externos. La generación de potencia eléctrica de  $270 V_{CC}$ , nivel que procede de la rectificación natural de los  $115 V_{CA}$  tradicionales, se realiza directamente desde un generador que incluye elementos de electrónica de potencia

integrados, que permiten conseguir la salida de tensión continua óptima. En esta situación la unidad de control del generador se encarga de conectar el generador al sistema de distribución a través de un contactor, ver Figura 2.4.

#### 2.2.1.2 Sistemas de generación de corriente alterna (CA)

Es el sistema más usado en la aviación comercial y militar en la actualidad. Se genera una tensión sinusoidal a partir de generadores más simples que los de CC, ya que no son necesarios los elementos rectificadores empleados para obtener la corriente continua. Los primeros generadores de CA usaban anillos deslizantes para transmitir la corriente desde los devanados del rotor, con los consiguientes problemas de abrasión. Sin embargo, los generadores modernos están compuestos por varios dispositivos funcionando sobre el mismo eje, por ejemplo: un PMG, un estator de excitación rodeando a un rotor de excitación (que contiene diodos) y un rotor de potencia en el interior de un estator de potencia.

Generalmente se trata de sistemas trifásicos con las fases conectadas en configuración de estrella a un punto neutro común, de forma que se obtiene típicamente una señal de 115 V<sub>CA</sub> y 400 Hz. Este tipo de generación consigue una tensión mucho mayor que la generación tradicional de 28 V<sub>CC</sub>. Este hecho puede parecer problemático a primera vista, al requerirse entonces mayores grados de protección. Sin embargo las ventajas son evidentes en cuanto a la transmisión de potencia, ya que al aumentar la tensión, para un mismo nivel de potencia, las corrientes son menores y, consecuentemente, se consiguen menores pérdidas, caídas de tensión y se reducen las secciones de los conductores.

A continuación se detallan algunas de las características básicas de los principales sistemas de generación propuestos en CA, los cuales proporcionan una idea clara de la evolución en este tipo de sistemas [Moir08]:

##### A. Generación con frecuencia constante (FC) mediante IDG.

La generación con frecuencia constante se realiza usando un acoplamiento del motor integrado en el generador IDG (*integrated drive generator*), que es un conjunto mecánico

integrado por un generador y una unidad de transmisión de velocidad constante CSD (*constant speed drive*).

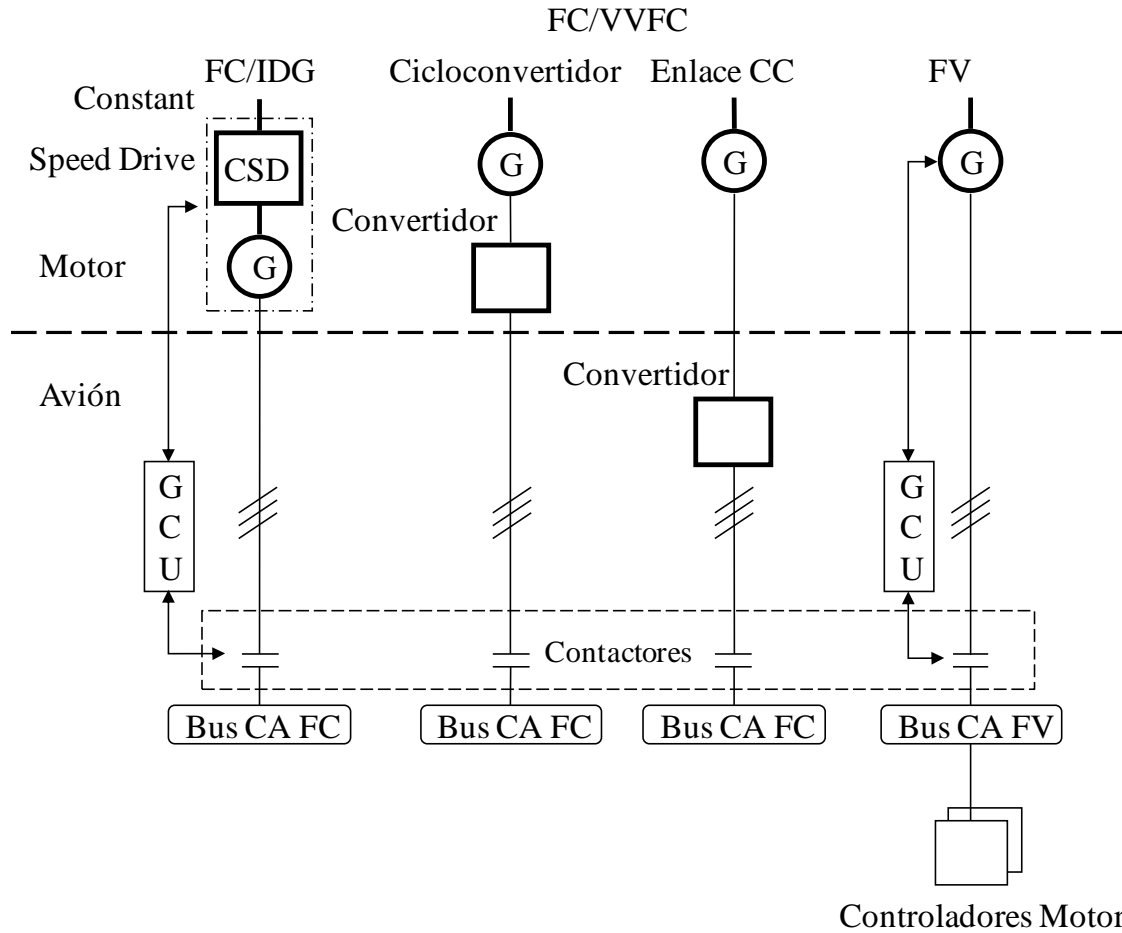
#### B. *Generación con velocidad variable y frecuencia constante (VVFC)*

En este caso la potencia de frecuencia variable obtenida del generador se convierte electrónicamente a potencia de 115 V<sub>CA</sub>, con frecuencia constante de 400 Hz. La conversión se realiza mediante dispositivos de conmutación de potencia de estado sólido, sin necesidad de elementos mecánicos, existen dos opciones:

- Enlace en CC, (*DC link*): se realiza la conversión a un estado intermedio de corriente continua antes de la transformación electrónica a corriente alterna trifásica. Este sistema ya se ha usado en el Boeing 737, en el MD-90 y en el Boeing 777.
- Cicloconvertidor: se generan 6 fases a relativamente alta frecuencia (~3000 Hz) y mediante dispositivos electrónicos de estado sólido se obtiene la señal trifásica de frecuencia constante. Este sistema se ha empleado ya con éxito en aplicaciones militares tales como el sistema de generación del F-18. Sin embargo, de momento solo se ha utilizado en aplicaciones militares.

#### C. *Generación con frecuencia variable (FV)*

Es el sistema más simple y fiable de generación. No se actúa para evitar los efectos de la variación de velocidad del motor, por lo que se obtiene directamente una salida con frecuencia variable en el rango típico de 380-720 Hz. Aunque, es la forma más simple, barata y fiable de generación de potencia, tiene la problemática que la frecuencia variable afecta al diseño y funcionamiento de los equipos conectados a la red. Los principales tipos considerados aparecen esquemáticamente en la Figura 2.5.



**Figura 2.5: Modos de generación de potencia eléctrica en CA**

### 2.2.1.3 Comparativa de los sistemas en CA y CC de generación existentes

En la Tabla 2.1 se muestra una lista de los diferentes sistemas de generación de potencia desarrollados y propuestos a lo largo de los últimos años para aviones civiles y militares [Moir08].

Como se puede apreciar en la Tabla 2.1 los sistemas de generación en CA están más presentes en plataformas civiles, mientras que los sistemas en CC predominan en los sistemas militares. Es importante señalar cómo con la evolución de los sistemas hay un aumento en los niveles de tensión en CA en aplicaciones civiles y en CC en aplicaciones de carácter militar.

Sistemas de generación de potencia en aviones civiles y militares				
Generación	Aplicación civil		Aplicación militar	
Tipo	Aeronave	Potencia	Aeronave	Potencia
28 V <sub>CC</sub>			C-101	10 kW
28 V <sub>CC</sub> & FV			C-235 & C-295	2x11kW&2x26kVA
Integración mecánica del motor-generator FC (115 V <sub>CA</sub> / 400 Hz)	B777	2x120 kVA	Eurofighter Typhoon	2x35/45 kVA
	A340	4x90 kVA		
	B737NG	2x90 kVA		
	MD-12	4x120 kVA		
	B747-X	2x40 kVA		
	B767-400	2x120 kVA		
VVFC (Ciclo convertidor) (115 V <sub>CA</sub> / 400 Hz)			F-18C/D	2x40/45 kVA
			F-18E/F	2x60/65 kVA
VVFC (Enlace en CC) (115 V <sub>CA</sub> / 400 Hz)	B777(Backup)	2x20 kVA		
	MD-90	2x75 kVA		
FV (115 V <sub>CA</sub> / 380-720 Hz típica)	Global Ex	4x40 kVA	Boeing JSF	2x50 kVA
	Horizon	2x20/25 kVA	[X-32A/B/C]	
	A380	4x150 kVA	A400M	4x75 kVA
FV (230 V <sub>CA</sub> )	B787	4x250 kVA		
	A350	4x100 kVA		
270 V <sub>CC</sub>			F-22 Raptor	2x70 kVA
			F-35	2x70 kVA

Tabla 2.1: Sistemas de generación de potencia en aviones civiles y militares

Por otro lado, en la Tabla 2.2 se muestra un análisis comparativo en relación con las características más importantes que presenta la generación de potencia eléctrica, tanto para los niveles convencionales de tensión de 28 V<sub>CC</sub> y de 115 V<sub>CA</sub> por fase, como para el caso del nuevo nivel de tensión de 270 V<sub>CC</sub>.

	Generación 28 V <sub>CC</sub>	Generación 115 V <sub>CA</sub>	Generación 270 V <sub>CC</sub>
Nivel de intensidad	✗	✓	✓
Eficiencia	✗	✗	✓
Caídas de tensión	✗	✓	✓
Fallo Arco	✓	✗	✗
Protecciones convencionales	✓	✓	✗
Operaciones en paralelo	✓	✗	✓

**Tabla 2.2: Comparativa de los niveles de tensión en generación**

### 2.2.2 Subsistema de Distribución Primaria

El sistema de distribución primaria es el primer nexo de unión entre el sistema de generación descrito en el apartado anterior y las cargas consumidoras. En la mayoría de los casos la salida desde las fuentes de generación se lleva, a través de unos conductores denominados en inglés “*feeders*”, a unas barras de escasa impedancia que se denominan barras colectoras o colectores y que, normalmente, se sitúan en cajas o paneles de distribución, desde los cuales se alimentan los diferentes circuitos del avión.

Por otro lado, el sistema de distribución se encarga del transporte de energía eléctrica, y de las exigencias derivadas de las condiciones anormales de funcionamiento que pueden presentarse. Para ello se tiende a dividir las barras y circuitos de distribución en secciones que se puedan alimentar desde fuentes de generación distintas. Para facilitar este objetivo es habitual clasificar los servicios a alimentar, por orden de importancia, en:

- **Servicios vitales:** se consideran los necesarios tras un aterrizaje de emergencia (alumbrado de emergencia, sistema de extintores,...) y se conectan directamente a las baterías en lo que se conoce como sistema de “barra caliente”, sin ningún tipo de elemento que los interrumpa.
- Los **sistemas esenciales:** son los mínimos para asegurar un vuelo seguro en emergencia y se conectan a barras (muchas veces con el mismo calificativo) de tal modo que se puedan alimentar siempre desde un generador o desde las baterías.
- Los **sistemas no esenciales:** son aquellos equipos que desarrollan funciones que pueden obviarse en vuelo en caso de emergencia, se denominan no esenciales y se conectan a barras (con igual designación, en general) que reciben alimentación desde los generadores [Pallet87].

Se suelen disponer barras de cada tipo asociadas a los distintos generadores e interconectadas entre sí de forma que se puedan conmutar los flujos en la manera adecuada a cada situación de operación. La función de gestión de la energía proporcionada directamente por el sistema de distribución eléctrico tiene que ser adecuada para manejar las demandas de potencia elevadas que puedan presentarse, por ejemplo, en caso de pérdida de un generador. A este respecto se puede contar con el apoyo que presta la desconexión de ciertas cargas que no se consideran esenciales en un determinado momento, definido con el término en inglés “*shedding*”. La evolución de los sistemas eléctricos embarcados hacia mayores necesidades de generación complica en gran medida la capacidad de prevención de sobrecargas, sobre todo por limitaciones de peso y volumen. La solución está ligada a nuevos conceptos basados en la “gestión inteligente de la potencia” con los que se intenta reducir la exigencia global de potencia incluso en las condiciones de mayor demanda, gracias a los nuevos controladores de potencia estado sólido [Partel03].

Otro elemento incluido dentro del subsistema de distribución son los contactores, que se utilizan durante la conmutación y los cambios de configuración. Los contactores son elementos electromecánicos. Además, estos elementos incluyen otros contactos auxiliares para proporcionar al sistema información sobre sus diferentes estados. Sus principales

limitaciones se encuentran en cuanto a la posibilidad de fallo por arco y al efecto rebote que puede aparecer en los contactos, en el momento de la conmutación, lo cual puede llegar a producir una perturbación que afecta a todo el sistema eléctrico.



**Figura 2.6: Contactor para 270 V<sub>CC</sub> fabricado por LEACH**

Debido al aumento de potencia requerida por las cargas, la conmutación desde las barras de distribución primaria se realiza cada vez más a menudo mediante unidades electrónicas con control de carga, ELCU (*Electronic Load Control Unit*) para aplicaciones en CA ó Controlador de potencia electromagnético, EMPC (*Electro Magnetic Power Controllers*) para aplicaciones en CC. Estos dispositivos, al igual que los contactores son de carácter mecánico y se usan para corrientes mayores de 20 A por fase en cargas de 7 kVA o más elevadas. Poseen unos devanados sensibles a la corriente que permiten medir su nivel en cada línea y componentes electrónicos asociados que permiten un control más robusto.



**Figura 2.7: Controlador de potencia electromagnético (EMPC)**



### 2.2.2.1 Comparativa de los sistemas de distribución en CA y CC

Desde el punto de vista del número de cables los sistemas en CC siempre son más simples que los sistemas trifásicos en CA. En cuanto a los niveles de tensión, al aumentar la tensión, disminuye la corriente necesaria para una misma potencia, por lo que puede reducirse la sección del cableado y, por consiguiente, el peso y volumen del mismo.



**Figura 2.8: Conectores para igual nivel de potencia en 28 V<sub>CC</sub> conector izquierdo y 270 V<sub>CC</sub> conector derecho**

Del mismo modo, serán necesarios conectores menores, ver Figura 2.8, aunque en este aspecto, es importante señalar que para el caso de CA se requiere disponer de conectores apropiados para manejar las tres fases, lo cual supone un incremento de peso y volumen de los equipos de corriente alterna. Los sistemas de almacenamiento siempre son más eficientes en CC que en CA, ya que no requieren de una transformación para su almacenamiento.

	Distribución 28V <sub>DC</sub>	Distribución 115 V <sub>AC</sub>	Distribución 270V <sub>DC</sub>
Nº líneas y barras	✓	✗	✓
Sección cableado (peso por línea)	✗	✓	✓
Conectores	✗	✗	✓
Sistemas de almacenamiento	✓	✗	✓

**Tabla 2.3: Comparativa en función de los niveles de tensión en distribución**

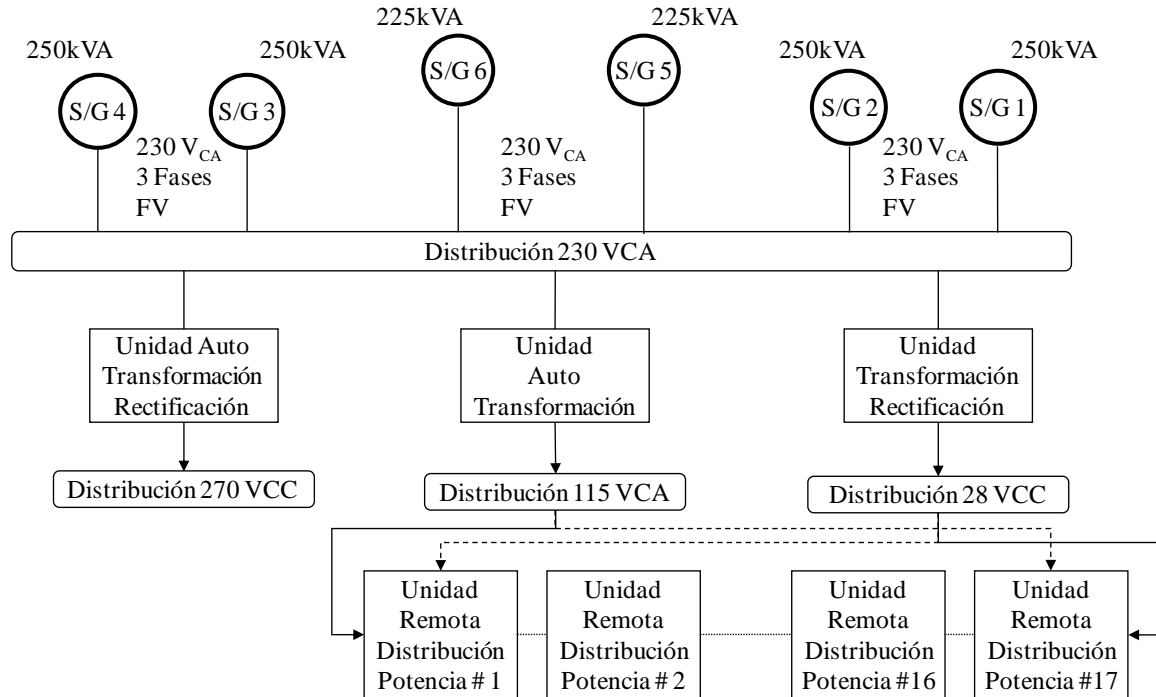
La Tabla 2.3 muestra un análisis comparativo de las características más importantes que presenta la distribución de potencia eléctrica, tanto para los niveles convencionales de tensión de  $28 V_{CC}$  y de  $115 V_{CA}$ , como para el caso del nuevo nivel de tensión de  $270 V_{CC}$ .

### 2.2.3 Área de Conversión

Los equipos de conversión, junto con el de generación, deben asegurarse de proporcionar la potencia eléctrica dentro de los estándares aplicables para cada equipo consumidor. De este modo, es posible emplear equipos con diferentes especificaciones de alimentación dentro de un mismo SDPE. Como niveles típicos de tensión de conversión de potencia eléctrica se pueden encontrar los siguientes casos de transformación en una aeronave [Barrado10]:

- Desde  $28 V_{CC}$  a  $115 V_{CA}$  mediante inversores.
- Desde  $115 V_{CA}$  a  $28V_{CC}$  uno de los más utilizados. Se realiza mediante unidades transformadoras y rectificadoras TRU (*Transformer Rectifier Unit*) ó cargadores de baterías.
- Desde  $115 V_{CA}$  a  $26 V_{CA}$  mediante transformadores.
- Desde  $270 V_{CC}$  a  $115 V_{CA}$  mediante inversor y desde  $270 V_{CC}$  a  $28V_{CC}$  mediante convertidor CC/CC, estos equipos se requieren en los nuevos diseños de aviones para adaptar la potencia a las características originales de los dispositivos embarcados.
- Desde  $230V_{CA}$  a  $\pm 270 V_{CC}$  mediante unidad auto transformadora y rectificadora, ATRU (*auto-transformer rectifier unit*).

Las salidas de todos estos equipos empleados en la conversión deben mantenerse dentro de unos límites determinados para el correcto funcionamiento del sistema completo.



**Figura 2.9: Esquema eléctrico simplificado B-787**

En el caso de los inversores, antiguamente se usaban equipos de inversión rotatorios, los cuales constaban de un motor de corriente continua que movían un generador de alterna. A pesar de que se mantiene en muchos aviones de pequeño tamaño, este tipo de dispositivo se ha visto sustituido, casi totalmente en la actualidad, por inversores de tipo estático totalmente regulados, basados en semiconductores como pueden ser tiristores, MOSFETs o IGBTs.

Al contrario que ocurre con los inversores, en el caso de los rectificadores se tiende a usar convertidores no regulados ó unidades transformadoras rectificadoras TRU (*Transformers Rectifier Unit*), en lugar de los regulados, debido a que presentan algunas ventajas. Se trata de dispositivos de menor tamaño y peso, mayor eficiencia, más baratos, más simples y fiables. Sin embargo, también presentan algunos inconvenientes, de este modo, la ausencia de regulación provoca un mayor margen de variación de la tensión de salida, lo cual limita el rango de potencia de las fuentes. El rizado impuesto a la salida es mayor y los comportamientos de carga de las baterías se ven influidos por las cargas conectadas en

paralelo, a menos que las propias baterías incluyan un dispositivo de carga específico, ver Figura 2.10.



**Figura 2.10: Unidad transformadora rectificadora (TRU)**

Otro de los convertidores utilizados en avión son los que se usan para realizar la carga de las baterías ó unidad rectificadora de carga de batería, BCRU (*Battery Charger Rectifier Unit*) que adapta la potencia recibida en su entrada a un nivel regulado de tensión de corriente continua para cargar las baterías. Esto implica tener equipos más pesados y voluminosos.

#### **2.2.4 Sistemas de baterías**

El sistema de baterías impide la interrupción de potencia y posibilita la alimentación de los equipos esenciales en caso de pérdida del sistema de generación. Además, las baterías permiten realizar operaciones y tareas de mantenimiento en tierra durante periodos limitados. Cada batería debe tener, además de los sistemas de conmutación y protección adecuados, un pulsador en la cabina que permita a la tripulación conectarla o desconectarla.

En la actualidad se usan tres tipos de tecnologías de baterías en los sistemas embarcados plomo-ácido, níquel-cadmio (Ni-Cd) y ión-litio (Li-Ion). En la Tabla 2.4 se muestra un análisis comparativo de las características más importantes que presentan los tres tipos de baterías anteriormente descritos.

	Plomo-Ácido	Ni-Cd	Li-Ion
<b>Tensión de Descarga</b>	Variable	Constante	Constante
<b>Efecto Memoria</b>	No	Sí	No
<b>Relación Energía/Peso</b>	Menor	Media	Mayor
<b>Descarga en Circuito Abierto</b>	Sí	No	No
<b>Tensión de Carga</b>	Menor	Mayor	Mayor
<b>Mantenimiento</b>	Mayor	Medio	Menor
<b>Vida en Servicio</b>	Menor	Medio	Mayor
<b>Requieren Control Electrónico Propio</b>	No	No	Sí
<b>Coste</b>	Bajo	Medio	Alto

**Tabla 2.4: Comparativa de las características de las baterías**

Las baterías de Plomo-Ácido fueron las que se introdujeron inicialmente en los sistemas de avión, y se denominan así debido a que sus electrodos contienen aleaciones de plomo y el electrolito está compuesto de ácido sulfúrico y agua. Actualmente se sustituyen por baterías más modernas, como las de Ni-Cd y, más recientemente, las de Li-Ion, debido a que en ambos casos se obtienen ventajas desde el punto de vista de mantenimiento, peso y volumen, entre otras. De este modo, las baterías del tipo Ni-Cd permiten su gestión por medio de unidades de control. Por otro lado, las baterías de tipo Li-Ion requieren un sistema de carga propio que suele estar integrado para contribuir a la seguridad, la reducción de volumen y la reducción de elementos de interconexión en el conjunto.

A pesar de que el coste de las baterías Ni-Cd es mayor que el de las de plomo-ácido, resulta más viable el empleo de las primeras debido a que poseen mayor densidad de energía (ahorro de peso), menores requisitos de mantenimiento y menor degradación, manteniendo una tensión de descarga prácticamente constante hasta su agotamiento. Sin embargo, no debe obviarse la presencia de efecto memoria en las baterías Ni-Cd.

Las baterías Li-Ion evitan la presencia del efecto memoria. Este aspecto, junto con la mayor densidad de energía y menor necesidad de mantenimiento, en comparación con las de tipo Ni-Cd, hace que las baterías Li-Ion se empiecen a considerar más apropiadas a pesar de su mayor coste, ver Figura 2.11.



**Figura 2.11: Batería Li-Ion de avión fabricada por SAFT**

### **2.2.5 Distribución secundaria**

El subsistema de distribución secundario se encarga de auto-configurar su estado dependiendo de las condiciones del entorno y las fuentes de generación que se encuentren activas en cada momento. En los sistemas convencionales esta función se realiza mediante distintos sistemas de cableado en combinación con elementos de conmutación mecánicos, los cuales permiten redirigir los flujos de corriente hacia los circuitos que se necesiten alimentar en cada momento.

La conmutación, en caso de corrientes por debajo de los 20 A, se suele realizar en los aviones convencionales por medio de relés. Los relés funcionan básicamente de la misma forma que los contactores pero son más simples, ligeros y baratos. Se usan preferiblemente en la conmutación de cargas secundarias de potencia media o alta. Para corrientes menores se pueden emplear interruptores simples que pueden ser operados también por la tripulación. Estos dispositivos presentan limitaciones de operación en vuelo por presión y temperatura, además de los problemas que presentan los elementos mecánicos.

Los metales conductores empleados en la fabricación de cables suelen ser el cobre y el aluminio. El cobre tiene baja resistencia específica y se adopta siempre que la sección necesaria no sea muy grande. Para la misma resistencia, un conductor de aluminio pesa dos tercios de lo que uno de cobre, pero con el doble de sección, por lo que se emplean en circuitos de poca longitud y resistencia, reduciendo de este modo el peso del sistema.

En cuanto a los materiales para el aislamiento, éstos han de cumplir estrictos requisitos de robustez, flexibilidad, resistencia a fluidos (combustible, aceite, líquido hidráulico,...), ausencia de inflamabilidad y, por supuesto, mínimo peso. De este modo se evitan problemas en el cableado e interferencias.

Un elemento clave en los sistemas de potencia eléctrica son los dispositivos que protegen al cableado, ante situaciones anormales de corriente excesiva por un cortocircuito. Estos eventos pueden llegar a fundir el aislante de los cables, producir incluso daños en los circuitos y equipos próximos, o incluso desencadenar un incendio. Para evitar este tipo de sucesos se emplean varios dispositivos como son los fusibles, los circuitos interruptores, CB (*circuit breakers*), los circuitos interruptores con detector de arco, AFCB (*arc fault circuit breakers*) y los circuitos interruptores con control remoto, RCCB (*remote control circuit breakers*). En el caso de generación a 270 V<sub>CC</sub> se ha requerido el desarrollo de nuevos dispositivos de protección, como los controladores de potencia de estado sólido, SSPC (*solid state power controller*), ante la insuficiencia de los dispositivos convencionales para niveles tan elevados de tensión. Todos ellos se describirán en mayor profundidad en el Capítulo 3.

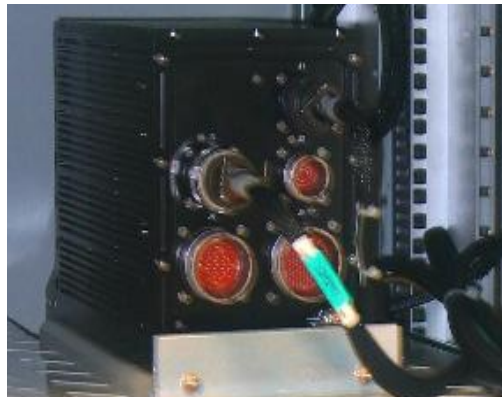
#### **2.2.6 Control del sistema eléctrico**

El incremento de complejidad y sofisticación de los diferentes subsistemas que forman parte del SDPE, ha llegado al punto de requerir equipos de control o computadores dedicados para muchas funciones del sistema de control. Gracias a las funciones de los sistemas de control y almacenamiento se asegura que el sistema de generación proporcione potencia dentro los estándares aplicables [MS704], que se desconecten las

fuentes en caso de fallo para evitar daños en la red y que se proporcione la información necesaria a la tripulación o al personal de mantenimiento en su caso.

Como se ha descrito en puntos anteriores, algunas partes del SDPE ya realizan funciones de control concretas. En el caso de los generadores, las GCU realizan las funciones de conectar o desconectar los generadores en caso de fallo. Por su parte, algunos equipos de conversión se auto-regulan mediante sistemas de control electrónico integrados. Para controlar cargas de alta potencia se usa cada vez más la conmutación mediante los ELCU en CA ó EMPC en CC, ya descritos anteriormente. Como se ha visto, el control del estado de carga de las baterías y su conmutación se realiza mediante reguladores de carga BCRU.

El desarrollo del sistema eléctrico de gestión de cargas, ELMS (*Electrical Load Management System*) del B777 por parte de la empresa General Electric Aviation, introdujo el primer sistema integrado de distribución de potencia y gestión de cargas para aviación civil. Las funciones del sistema se realizan por medio de unidades electrónicas montadas en paneles de gestión. Cada una de ellas contiene un conjunto módulos reemplazables LMR (*Line Replaceable Module*). Se trata de un sistema inteligente que permite reconfigurar las cargas eléctricas de forma que se obtenga la distribución óptima para el nivel de potencia disponible.



**Figura 2.12: Computador de gestión de cargas (LMC) fabricado por Indra**

Por otro lado, la tendencia de los SDPE se orienta hacia la integración de un software que controle y gestione el sistema, mediante un computador de gestión de cargas, LMC (*Load*



*Management Computer*), ver Figura 2.12, el cual toma las decisiones en función de las informaciones que recibe desde los equipos del SDPE [Izquierdo10]. En este sentido la aparición de los SSPC ha abierto un nuevo camino en cuanto al control de cargas. Por lo tanto, el empleo de los avances en las tecnologías de estado sólido, aplicados directamente en los SSPC, puede lograr un mejor control de los sistemas de distribución y una protección más avanzada del cableado.

## 2.3 Clasificación de los sistemas de distribución de potencia eléctrica embarcados

Debido a las diferencias que existen, en cuanto a operación, normativas, etc., entre los aviones civiles y militares, se pueden observar arquitecturas eléctricas embarcadas muy distintas. En los siguientes apartados se describen las características básicas de algunas arquitecturas de distribución convencionales, así como las de los nuevos sistemas eléctricos embarcados en los aviones desarrollados durante los últimos años.

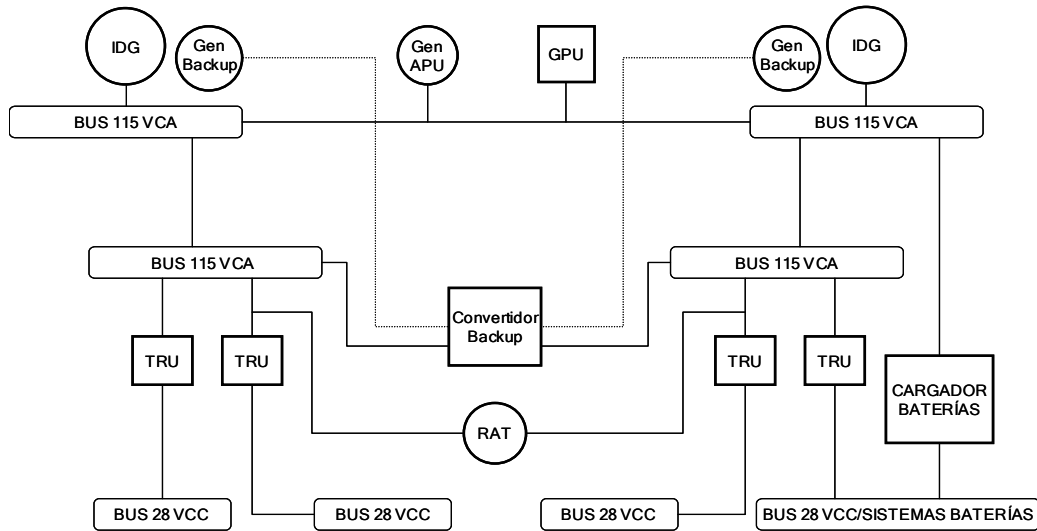
### 2.3.1 Sistemas eléctricos en aviones civiles convencionales

Los dos fabricantes más importantes hasta la fecha de este tipo de aviones son, en la actualidad, Boeing y Airbus. Algunos modelos de avión fabricados por ellos son: B-777, A-320, A-330 y A-340.

#### 2.3.1.1 Boeing

El esquema básico del Boeing B-777, ver Figura 2.13, incluye dos canales primarios de CA iguales, alimentados por sendos generadores mediante IDG que proporcionan potencia eléctrica trifásica de  $115 V_{CA}$  a 400 Hz. Cada uno de los buses principales de CA alimenta otros buses secundarios y equipos de conversión. En el SDPE se utilizan dispositivos TRU en la conversión de  $115 V_{CA}$  a  $28 V_{CC}$  para alimentar los buses de CC, en los cuales están conectadas las baterías, de forma que se mantiene su nivel de carga, y en caso de pérdida del generador puedan aportar energía y mantener el nivel de tensión requerido.

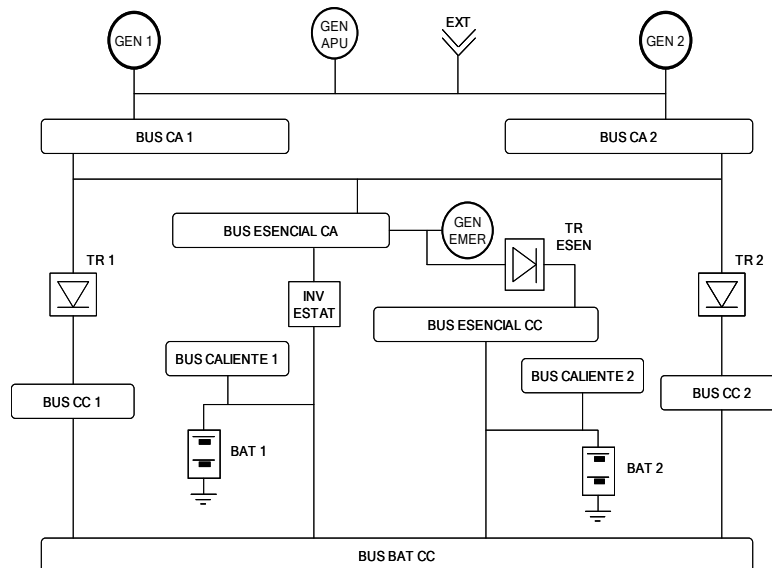
El generador de la APU y la toma exterior de potencia también pueden alimentar los buses principales, a los que están conectados mediante contactores que permiten su conexión y desconexión según las necesidades de operación, mediante un sistema integrado inteligente de distribución de potencia y gestión de cargas, como ya se ha comentado anteriormente al hablar de los sistemas de control y gestión en el epígrafe 2.2.6.



**Figura 2.13: Esquema eléctrico simplificado del Boeing B-777**

### 2.3.1.2 Airbus

El SDPE del A-320, ver Figura 2.14, incluye dos canales primarios de 115 V<sub>CA</sub> iguales, alimentados por sendos generadores. Cada uno de los buses principales de CA tiene conexiones que permiten la alimentación del bus esencial de CA, y de los buses principales de 28 V<sub>CC</sub> (por medio de unidades de rectificación en este caso).



**Figura 2.14: Esquema eléctrico simplificado del Airbus A-320**

El bus esencial de CA puede recibir además potencia eléctrica tanto del generador de emergencia, como del bus de baterías por medio de un inversor. El generador de emergencia proporciona energía también al bus esencial de CC, a través de una unidad de rectificación. Esta barra esencial está a su vez conectada a las baterías y a los buses principales de CC. El generador de la APU y la toma exterior de potencia también pueden alimentar los buses principales de CA, a los que están conectados mediante contactores que permiten su conexión y desconexión según las necesidades de operación.

El esquema básico del A-330, ver Figura 2.2, presenta similitud con el del A-320. Comprende dos buses primarios de 115 V<sub>CA</sub> iguales, alimentados por sendos generadores de frecuencia variable. En el caso del A-340, los elementos presentes en el esquema eléctrico de alto nivel son muy similares a los ya presentados anteriormente para el A-320 y el A-330, con la particularidad de que el sistema está compuesto de 4 motores y 4 generadores.

### 2.3.2 Sistemas eléctricos en aviones militares convencionales

En los siguientes párrafos se describen los SDPE de algunos de los aviones militares fabricados por EADS a lo largo de las últimas décadas, como pueden ser los aviones militares: C-101, C-295, CN-235, Eurofighter y A-400, ver Figura 2.15 [Andreu09].

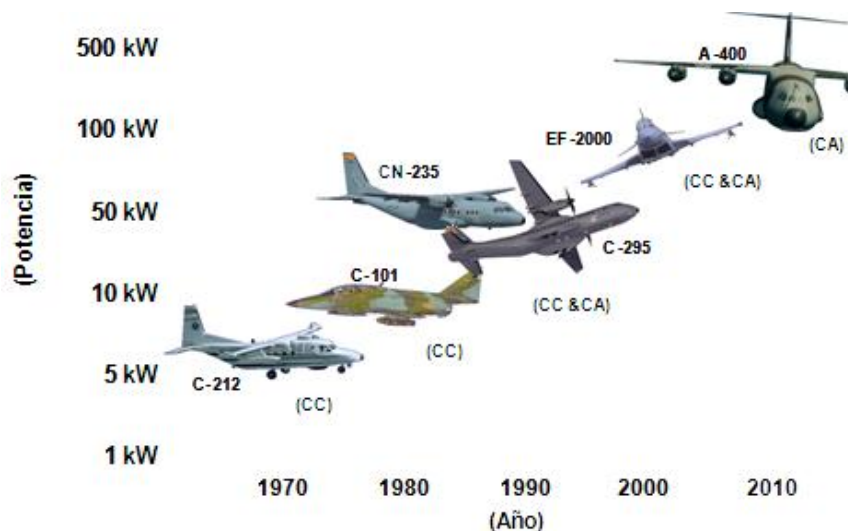
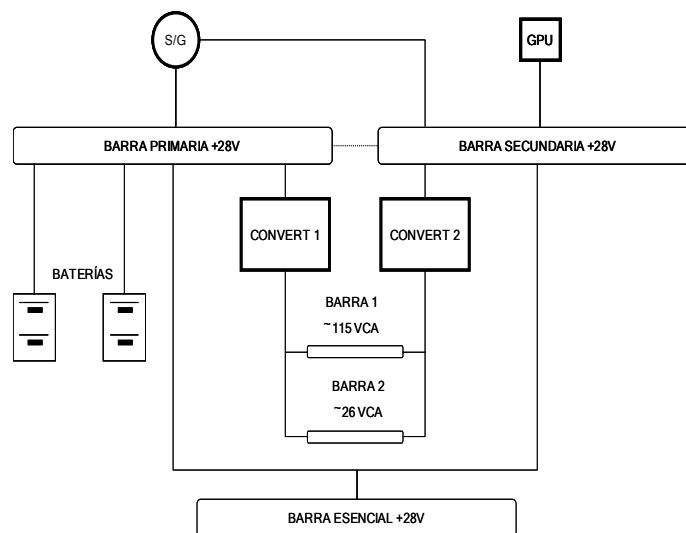


Figura 2.15: Evolución de la demanda de potencia eléctrica en aviones militares

En la Figura 2.16 puede verse que en el caso del C-101, básicamente, el sistema comprende un generador de 28 V<sub>CC</sub> para suministrar potencia eléctrica a dos barras (primaria y secundaria) de CC. Por medio de varios inversores se obtiene, desde las barras primaria y secundaria, potencia eléctrica de otros niveles de tensión en CA (115 V<sub>CA</sub> y 26 V<sub>CA</sub>). Las barras primaria y secundaria están ligadas entre sí y con la barra esencial mediante contactores que permiten mantener el flujo de energía en las cargas esenciales, en caso de fallo de alguna de las líneas de generación. A este efecto también se disponen baterías asociadas a la barra primaria, que evitan la pérdida de potencia eléctrica por fallo del generador.

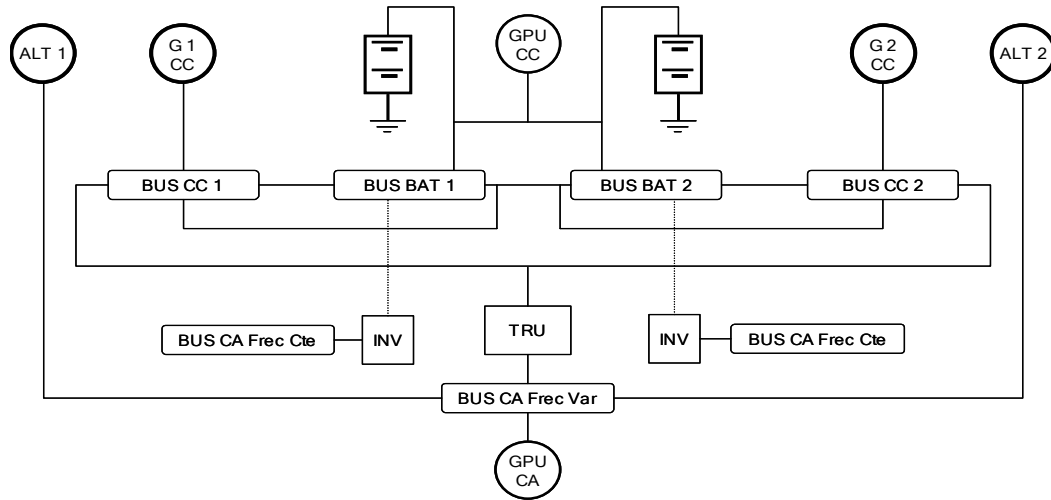


**Figura 2.16: Esquema eléctrico simplificado del CASA C-101**

En caso del C-295, ver Figura 2.17, la potencia eléctrica se obtiene a partir de dos parejas de generadores de 28 V<sub>CC</sub> y alternadores de 115 V<sub>CA</sub>, movidos cada uno de ellos por uno de los motores. Si se compara con el avión C-101, hay un incremento en los niveles de potencia demandados por lo que es necesario incrementar los niveles de tensión, y por lo tanto utilizar potencia en CA. Los buses de CC están interconectados entre sí, y soportados por un par de buses alimentados directamente desde sendas baterías.

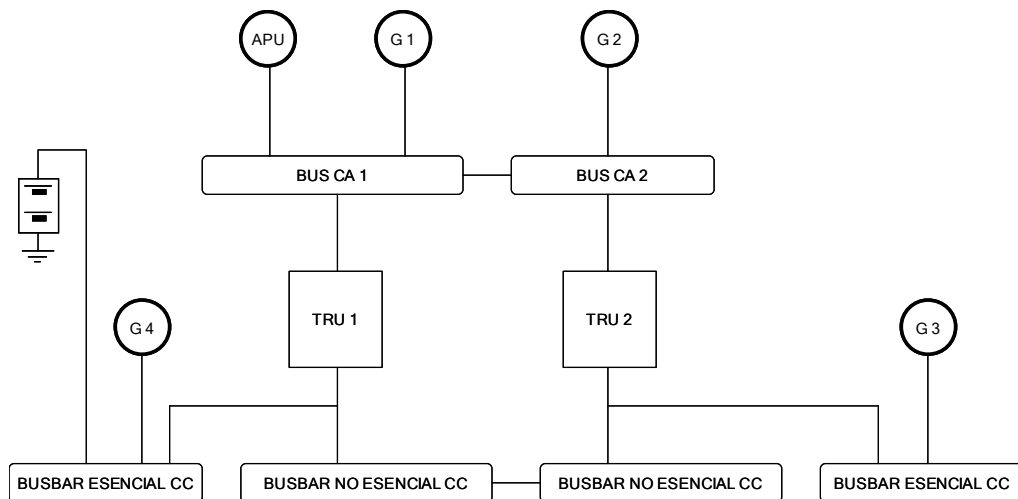
En el C-295, Figura 2.17, también se puede obtener energía a partir de una GPU de CC conectada a los buses de las baterías o partir de una de CA conectada con la TRU. Un aspecto no mostrado en el esquema es la posibilidad de obtener también potencia eléctrica

de CA a 115 voltios, para el sistema desde las fuentes de CC, por medio de inversores estáticos [C295AD07] [C295TR07].



**Figura 2.17: Esquema eléctrico simplificado CASA C-295**

En el avión Eurofighter, con la arquitectura eléctrica incluida en la Figura 2.18, cada uno de los dos motores incorpora una pareja de generadores formada por un generador de 115 V<sub>CA</sub> y otro de 28 V<sub>CC</sub>. De este modo, se contempla la generación de energía tanto en CA como en CC, siendo la distribución de potencia principal en CA.

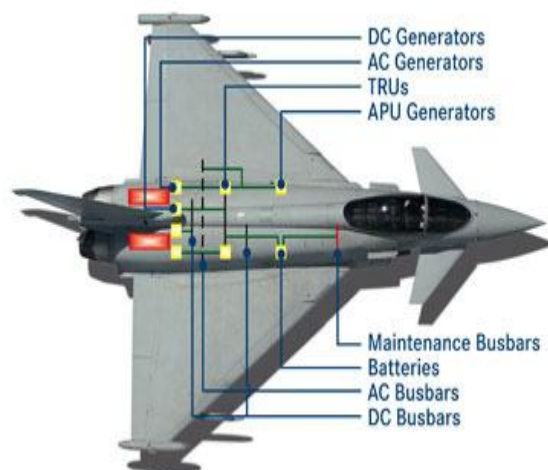


**Figura 2.18: Esquema eléctrico simplificado Eurofighter ©**

Los generadores de CA alimentan sendas barras de CA interconectadas entre sí, además de proporcionar alimentación a dos TRU, que dan energía a dos barras esenciales y no esenciales de CC. Es importante señalar que los generadores de corriente continua alimentan las barras esenciales de CC en caso de pérdida de las fuentes de generación en CA.

Por otro lado, en caso de fallo de los sistemas de generación en CC y CA, las barras esenciales se pueden alimentar desde las baterías. Durante las operaciones en tierra, el generador asociado a la APU puede contribuir a la alimentación de las barras de CA [Eurofighter].

La localización en el avión de los elementos básicos que componen este SDPE se presenta de forma más visual en la Figura 2.19.



**Figura 2.19: Visualización básica del sistema eléctrico del Eurofighter ©**

### 2.3.3 Nuevos sistemas eléctricos

Los aviones de hoy día están evolucionando hacia una mayor presencia de equipos eléctricos y electrónicos a bordo, aumentando las necesidades de generación y distribución de potencia eléctrica en los sistemas embarcados. Estos aspectos unidos al desarrollo de avances en los campos relacionados con la electrónica de potencia y con la propia tecnología de los motores, han desembocado de forma visible en la necesidad de plantear nuevas formas de extracción de potencia que no afecten de manera

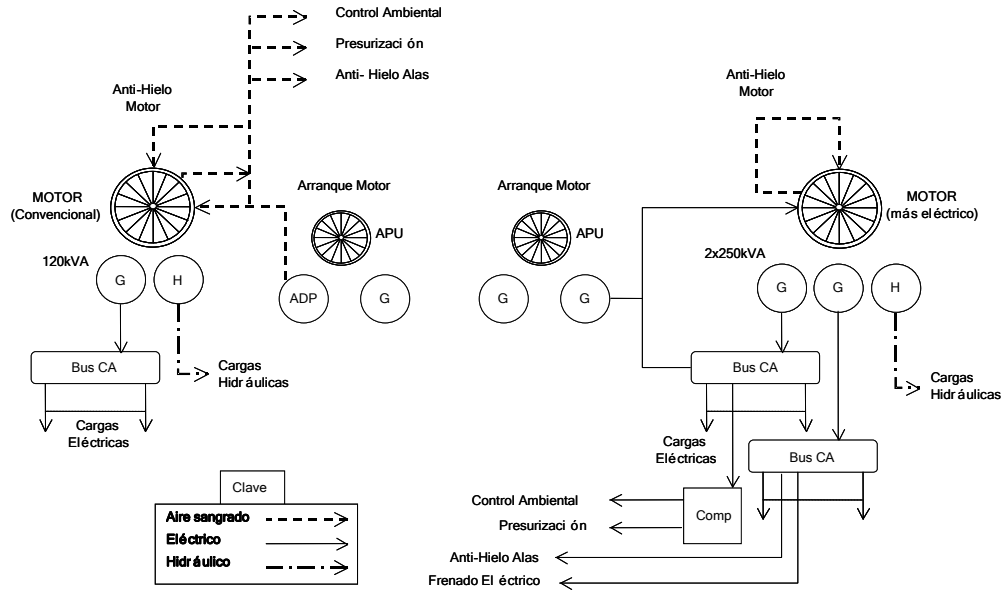
excesivamente adversa a las características operativas de los motores. De este modo, las técnicas convencionales de extracción de potencia de los motores, para alimentar los sistemas del avión [Lázaro01] [Lombardo94]:

- **Potencia eléctrica**, mediante generadores movidos por los motores del avión.
- **Potencia hidráulica**, mediante bombas movidas por los motores del avión.
- **Potencia neumática**, mediante el sangrado de aire a presión en las etapas intermedias y de alta presión del compresor del motor del avión.

han evolucionado de forma apreciable ha sistemas de distribución cada vez más eléctricos, donde la potencia eléctrica es el principal tipo de energía extraída a partir de la potencia mecánica de los motores, introduciendo el concepto del avión más eléctrico, MEA (*more electric aircraft*) e incluso el concepto de avión totalmente eléctrico, AEA (*all electric aircraft*). De esta manera se obtendrá un mejor y más eficiente funcionamiento del sistema con requisitos de mantenimiento menores [Spitzer84] [Kankam01] [Howse03] [Blanding06] [Faleiro06] [Rosero07].

Como ejemplo de este concepto, en la Figura 2.20 se muestra la comparativa entre los sistemas de potencia utilizados en el Boeing B-767 (convencional-izquierda) y el del Boeing B-787 (más eléctrico-derecha), donde se aprecia una notable reducción del sangrado de aire mediante el empleo de sistemas más dependientes de la energía eléctrica. Principalmente se observa como en el B-787 se ha prescindido de la bomba movida por aire, ADP (*air driven pump*). En definitiva, las principales diferencias entre una configuración convencional y una *más eléctrica* son la reducción del sangrado de aire al motor, el incremento de la energía eléctrica generada y el uso de sistemas de arranque eléctricos para los motores [Moir08].



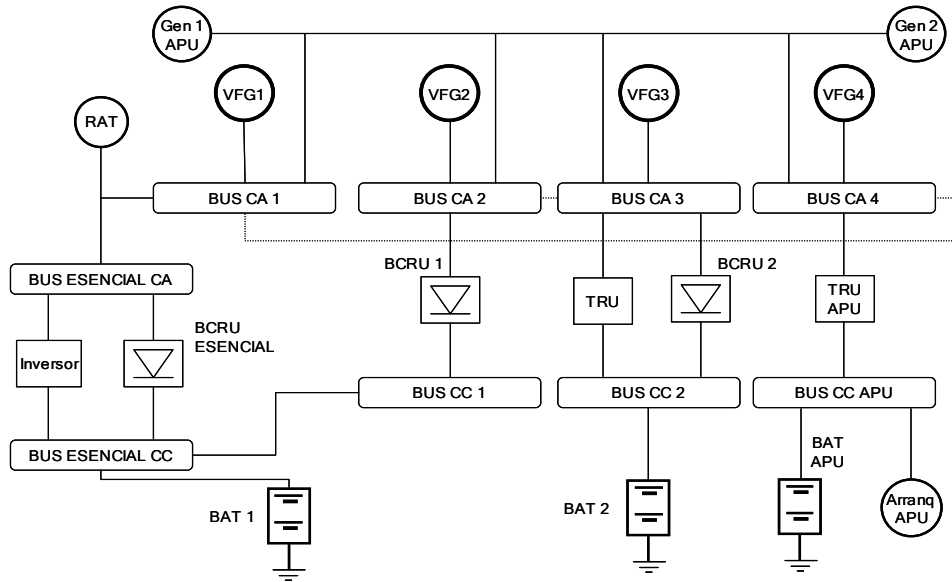


**Figura 2.20: Esquema comparativo configuración convencional/configuración *más eléctrica***

Bajo los ideales del nuevo concepto de “avión más eléctrico” se han desarrollado, y se están desarrollando, nuevos sistemas de distribución basados básicamente en dos niveles de tensión, dependiendo de su aplicación civil o militar. En aplicaciones civiles se emplea CA con niveles de tensión de 230 V<sub>CA</sub> como puede verse actualmente en el Airbus A-350 ó el B-787 [Moir08], aunque hay una fuerte tendencia hacia la introducción de tensiones de  $\pm 270$  V<sub>CC</sub>. Por otro lado, en el ámbito militar comienza a tener gran relevancia el desarrollo de sistemas de 270 V<sub>CC</sub> [Maldona97] [Emadi00] [Han06] [Allen04], muy ligados al concepto de “avión más eléctrico” y presentes en plataformas como el F-22 o el F-35 JSF.

### 2.3.3.1 Aviones civiles

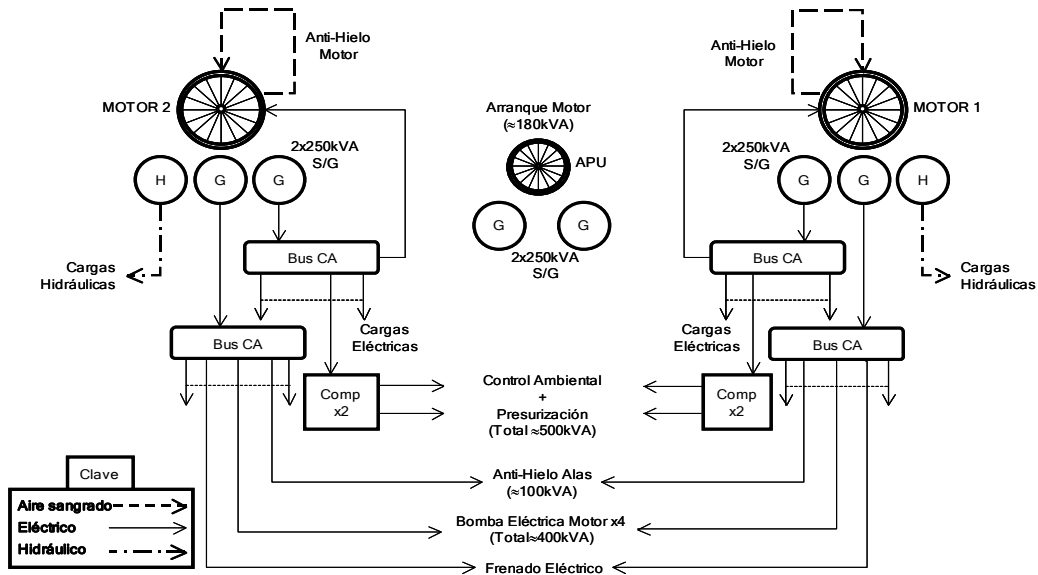
Las nuevas tendencias en el desarrollo de sistemas eléctricos dentro del campo de la aviación civil pueden observarse en modelos de avión como el A-380 y el B787.



**Figura 2.21: Esquema eléctrico simplificado del A-380**

El A-380 cuenta con cuatro generadores de frecuencia variable (uno en cada motor), dos generadores de APU a frecuencia constante y un generador de emergencia movido por la RAT. Cada generador principal alimenta, controlado mediante una GCU, uno de los buses de distribución primaria de CA, desde los que se obtiene potencia en CC mediante rectificación para alimentar dos buses de CC, ver Figura 2.21. El bus de CC está también asociado a los generadores de APU (arranque), conectado por un lado a uno de los buses de CA mediante una unidad de rectificación, TRU (*Transformer Rectifier Unit*) y por otro lado a las baterías de APU.

Para asegurar la alimentación de las cargas esenciales en corriente alterna, existe un bus esencial de CA, que puede obtener potencia desde la RAT o desde los buses primarios de CA; se conecta mediante rectificadores y un inversor a un bus esencial de CC, lo cual le permite obtener potencia desde las baterías. Debido a las diferencias de frecuencia no se pueden conectar los buses en paralelo y se requieren dispositivos de control para las cargas, si bien la generación de potencia se realiza de forma más económica, sencilla y fiable. A nivel de distribución secundaria es importante señalar que se incluyen SSPC para el control de cargas no esenciales, en prácticamente todos los sistemas.

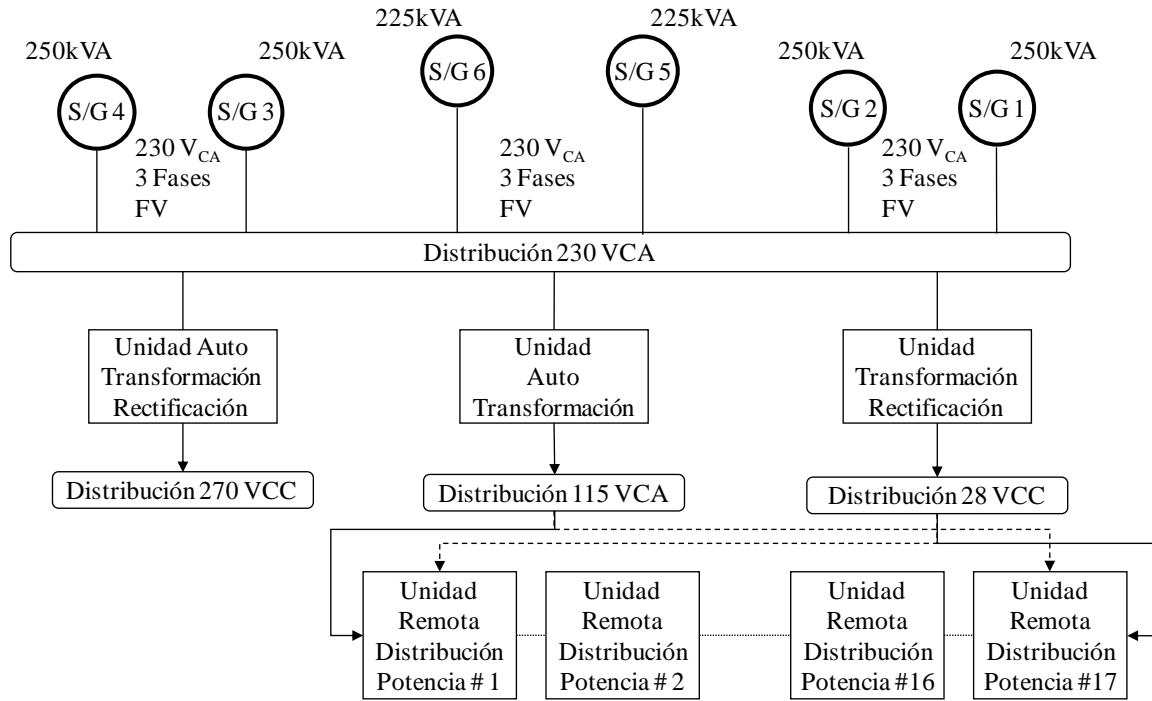


**Figura 2.22: Esquema simplificado de cargas eléctricas del B-787**

El concepto del avión más eléctrico está bastante presente en el B-787, si se tiene en cuenta que el único aire de sangrado de los motores se obtiene desde el ventilador de baja presión, utilizándose únicamente para el sistema anti-hielo del propio motor, como se observa en la Figura 2.22. Se debe tener en cuenta que el sangrado de aire resulta energéticamente muy caro. Por ello, la sustitución en lo posible de los sistemas que requieren sangrar aire por otros que operan a partir de energía eléctrica realizando las mismas funciones resulta una opción altamente ventajosa desde el punto de vista de la eficiencia. Como consecuencia inevitable aparece la necesidad de incrementar la cantidad de energía eléctrica generada y las funcionalidades del sistema de distribución y protección para el correcto funcionamiento del avión.

En el B-787 existen cuatro generadores (de tipo arrancador/generador) de frecuencia variable asociados dos a cada motor y otros dos generadores asociados a la APU. Como se ha mencionado, la generación se lleva a cabo con tensiones de  $230 \text{ V}_{CA}$ , frente a los  $115 \text{ V}_{CA}$  que se emplean habitualmente en las plataformas de Boeing, permitiendo disminuir las pérdidas y el peso de cableado, pero obligando a tomar ciertas precauciones frente a posibles efectos de descarga parcial (efecto corona) y descargas disruptivas. Desde el sistema de distribución primario se alimentan cargas a  $230 \text{ V}_{CA}$  y se redistribuye

potencia mediante dispositivos de transformación hasta las cargas que requieren otros niveles de tensión. Para ello se incluyen barras de distribución de 270 V<sub>CC</sub>, 115 V<sub>CA</sub> y 28 V<sub>CC</sub>, cada una de las cuales recibe la energía desde la barra principal por medio de su unidad de transformación correspondiente, ver Figura 2.23.



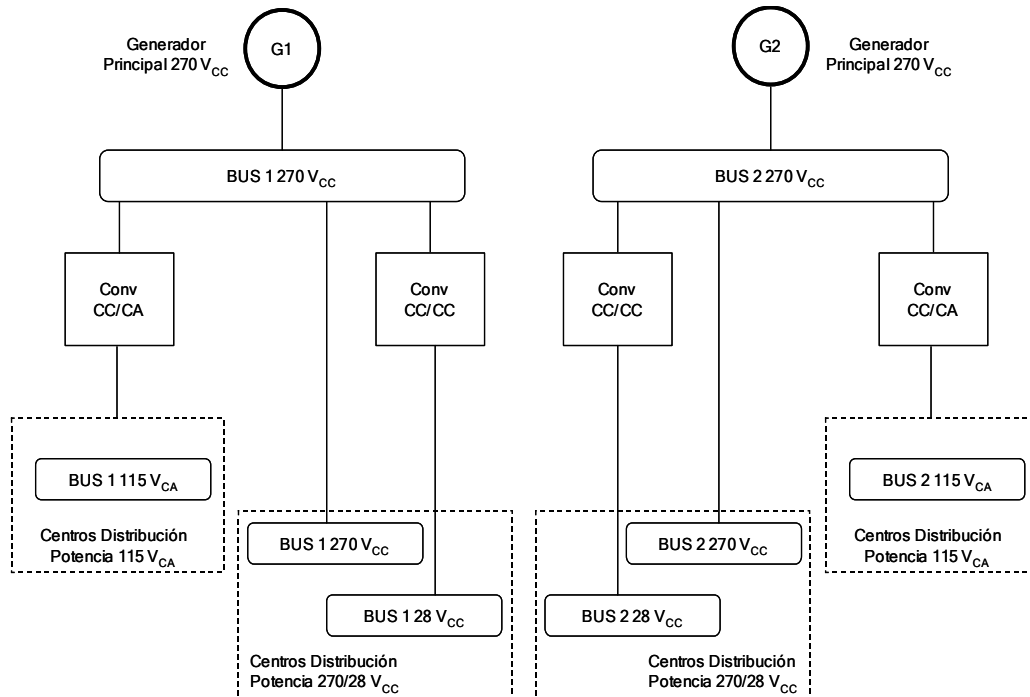
**Figura 2.23: Esquema eléctrico simplificado B-787**

### 2.3.3.2 Aviones militares

En el caso de los nuevos diseños para aplicaciones militares se pueden contemplar varios ejemplos. En el área de los aviones de combate se tienen el F-22 y el F-35 JSF (*Joint Strike Fighter*) del fabricante Lockheed Martin. En cuanto al transporte militar se puede tomar como muestra el sistema del Airbus A-400.

El esquema básico del sistema eléctrico del F-22 presenta ya un tipo de generación de CC de alta tensión, ver Figura 2.24. La arquitectura incluye dos generadores en los motores que proporcionan potencia eléctrica de 270 V<sub>CC</sub> para alimentar dos buses principales de CC. Desde cada uno de estos buses se distribuye potencia a otros buses secundarios de 270 V<sub>CC</sub>, 115 V<sub>CA</sub> y 28 V<sub>CC</sub>, que se agrupan en centros de distribución desde los que se

proporciona energía al resto del sistema. La energía entregada a los buses de 115 V<sub>CA</sub> y 28 V<sub>CC</sub> se realiza utilizando equipos de conversión CC/CA y CC/CC, respectivamente.



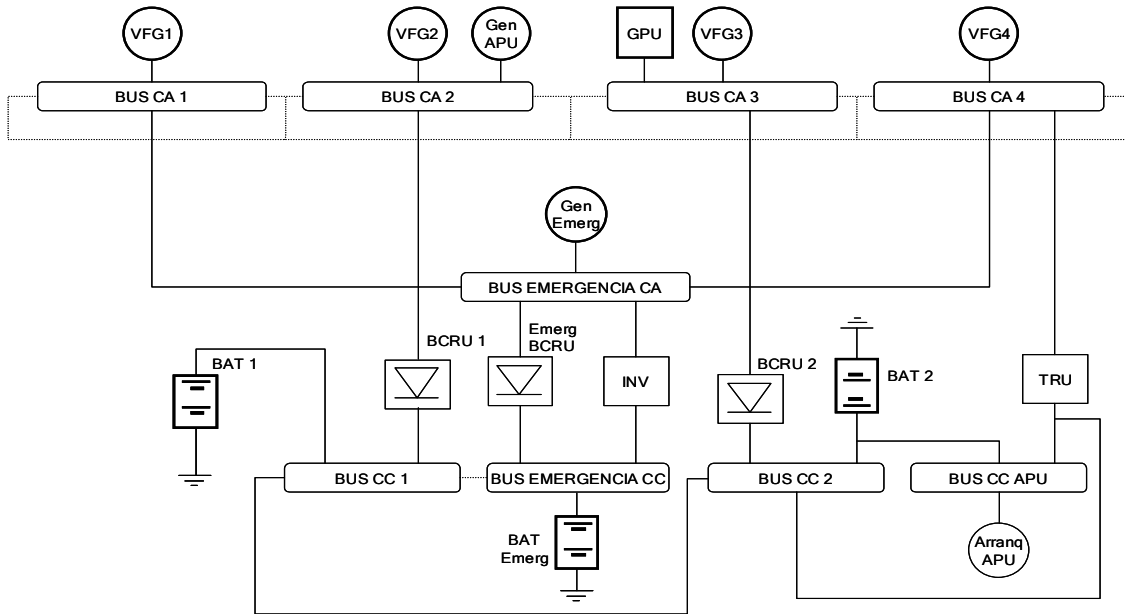
**Figura 2.24: Esquema eléctrico simplificado alto nivel del F-22**

Por su parte, el F-35 JSF [TEAMJSF], Figura 2.25, que se encuentra en fase de desarrollo, incluye tecnología más eléctrica y un bus de distribución a 270 V<sub>CC</sub> [Doyle00], con una arquitectura muy similar a la presentada en el F-22.



**Figura 2.25: F-35 JSF fabricado por Lockheed Martin**

En el caso del A-400 fabricado por Airbus Military, la potencia eléctrica necesaria se obtiene, principalmente, a partir de cuatro generadores de frecuencia variable acoplados uno a uno a los motores, una arquitectura muy similar a la utilizada por el avión civil A-380, ver Figura 2.26.



**Figura 2.26: Esquema eléctrico simplificado del A-400**

Por otro lado, se puede señalar que existe un bus de emergencia de CA al que pueden proporcionar energía un generador de emergencia, y un bus de emergencia de CC conectado de forma bidireccional con el bus de emergencia de CA, usando para ello una unidad BCRU para la transformación de energía desde el bus de CA al de CC y un inversor en sentido contrario. Igualmente, al bus de emergencia de CC llega energía también directamente desde las baterías. Estas arquitecturas se han basado en las plataformas civiles que fabrica Airbus.

## **2.4 Iniciativas tecnológicas**

Como se ha descrito anteriormente el concepto de MEA y AEA se orienta a la reducción de la necesidad de potencia hidráulica y de sangrado de aire a presión de los motores, mediante la sustitución por elementos que realicen sus mismas funciones alimentándose a partir de energía eléctrica. Estos objetivos requieren la generación de niveles de potencia eléctrica mucho más elevados y se estima que este tipo de sistemas puede llegar a demandar unos 500 kW por generador, esto representa varias veces los niveles actuales. Para solucionar esta problemática se parte de la generación de potencia eléctrica a niveles de 270 V<sub>CC</sub> ó 230 V<sub>CA</sub> [Maldona97] [Emadi00] [Moir08], en lugar de generar los tradicionales niveles de 115 V<sub>CA</sub> y 28V<sub>CC</sub> [Pallet87]. El aumento del nivel de tensión en CC en estos sistemas tiene como primera ventaja el manejo de corrientes unas 10 veces menores para las mismas potencias. Este hecho permite reducir la sección de los cables y, como consecuencia, el peso del cableado. Por otra parte, mediante la alimentación, directamente en corriente continua de los grandes consumidores, se reduce el número de cables y etapas de conversión, frente a la opción tradicional de emplear corriente alterna trifásica. En definitiva, aplicando esta metodología se consigue una generación más eficiente, una reducción de las necesidades de conversión y, en consecuencia, mejoras respecto al peso de los SDPE.

Sin embargo, el aumento del nivel de tensión plantea problemas en el funcionamiento de algunos elementos como pueden ser los dispositivos de protección convencionales [Izquierdo08]. Además, pueden presentarse otros inconvenientes, debidos a efectos físicos provocados por el aumento de tensión en el cableado, como pueden ser el efecto corona o el fallo por arco, entre otros [Cotton08] [Lopez10].

Para hacer frente a los numerosos cambios que este salto tecnológico supone en el sector de la aviación, diferentes agrupaciones de países de la Unión Europea y Estados Unidos, así como, entidades ó empresas privadas como Airbus, Boeing, etc., están desarrollando o han desarrollado proyectos/programas de I+D, enfocados a la definición e implementación de este nuevo concepto de avión. En Europa se pueden citar los

programas como el POA, MOET y CleanSky, todos ellos incluidos dentro de programas de financiación europeos. Otros proyectos destacables de menor envergadura, son los programas TIMES (*“Totally Integrated More Electric Systems”*) y DEPMA (*“Distributed Electrical Power Management Architecture”*) y el programa HV270DC, desarrollado por EADS en España. En Estados Unidos, por su parte, se puede destacar el proyecto MADMEL realizado en los años 90. En los siguientes párrafos se describen algunos de estas iniciativas tecnológicas internacionales.

#### 2.4.1 POA

*Power Optimized Aircraft*, proyecto desarrollado por la Unión Europea dentro del “VI Programa Marco” lanzado en enero del 2002 y que finalizó en el 2007. En este proyecto se pretendía conseguir los siguientes objetivos, todos ellos relacionados con la optimización de los consumos de potencia de una aeronave [Faleiro06]:

- Un 25% de reducción en el pico de la potencia usada en los sistemas que no sean de propulsión.
- Una reducción en la potencia media de los sistemas que no sean de propulsión.
- Una reducción de un 5% en consumo de combustible.
- Una reducción en el peso de los equipos.
- Evitar la degradación en los nuevos desarrollos, en relación con los costes de producción, los costes de mantenimiento o la fiabilidad.

#### 2.4.2 MOET

El programa MOET (*More Open Electrical Technology*), programa de desarrollo europeo dentro del “VI Programa Marco”, lanzado en enero del 2002 y que finalizó en el 2006, tenía como el objetivo el análisis y selección de arquitecturas de distribución eléctrica para los sistemas eléctricos, abordado también dentro del proyecto POA. En este programa se consideran las ventajas e inconvenientes de la corriente alterna o corriente continua, dependiendo del tamaño de la aeronave y las necesidades de los usuarios. El



programa MOET no es un programa aislado y se nutre de los resultados de otros programas de investigación, que se realizan en sistemas embarcados, de los cuales se puede destacar [MOET04]:

- ALCAS, proyecto en el que destaca el uso de sistemas más eléctricos, dentro de una estructura de avión completamente realizada en materiales compuestos.
- VIVACE, proyecto donde se identifican las herramientas de simulación, para el diseño del entorno del MEA.
- CELINA, proyecto centrado en identificar soluciones para redes de emergencia, basadas en la tecnología de las pilas de combustible.

La arquitectura del SDPE propuesta en el programa MOET, Figura 2.27, se basa en dos generadores, uno de ellos con la funcionalidad de arrancador/generador. Estos generadores se incorporan en un motor de forma que cada uno proporcione unos 100 kW de potencia eléctrica con niveles de tensión de 270 V<sub>CC</sub>.

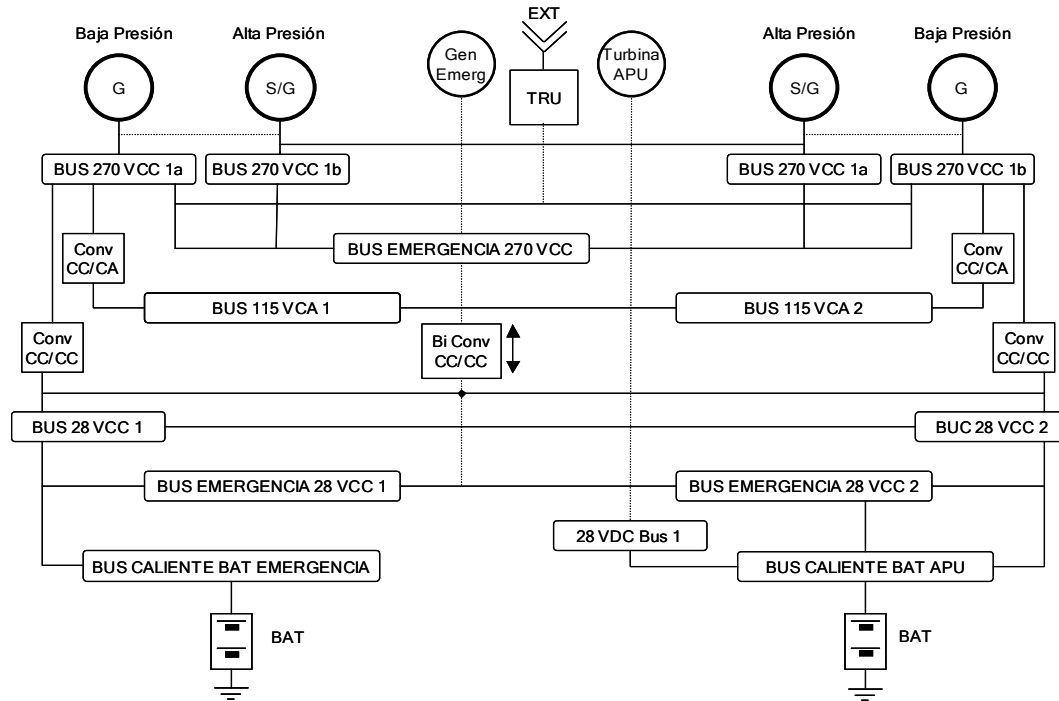
Para proporcionar energía al sistema en tierra se presentan dos posibilidades. Por un lado, un arrancador/generador asociado al APU, que proporciona aproximadamente 100 kW a 270 V<sub>CC</sub>, y además puede apoyar al sistema de generación en vuelo. Por otro lado, mediante un sistema de conectores y una TRU para obtener 270 V<sub>CC</sub> desde 115 V<sub>CA</sub> se puede obtener energía en tierra a partir de una fuente externa GPU.

Existe además un generador de emergencia encargado de suministrar potencia eléctrica de 270 V<sub>CC</sub> al sistema en caso de emergencia.

El sistema de distribución lo componen cuatro barras principales de 270 V<sub>CC</sub>, una barra de emergencia de 270 V<sub>CC</sub>, 2 barras principales de 28 V<sub>CC</sub>, dos barras de baterías de 28 V<sub>CC</sub>, dos barras de emergencia de 28 V<sub>CC</sub> y dos barras de 115 V<sub>CA</sub>.

Las barras de 115 V<sub>CA</sub> y las principales de 28 V<sub>CC</sub> se alimentan mediante convertidores CC/CA y CC/CC, respectivamente, desde las barras principales de 270 V<sub>CC</sub>. Por otro lado, las barras de emergencia de 270 V<sub>CC</sub> se interconectan con las barras de emergencia

de 28 V<sub>CC</sub>, mediante un convertidor bidireccional para permitir el flujo en ambos sentidos según el modo operativo concreto.



**Figura 2.27: Arquitectura del sistema eléctrico propuesto en MOET**

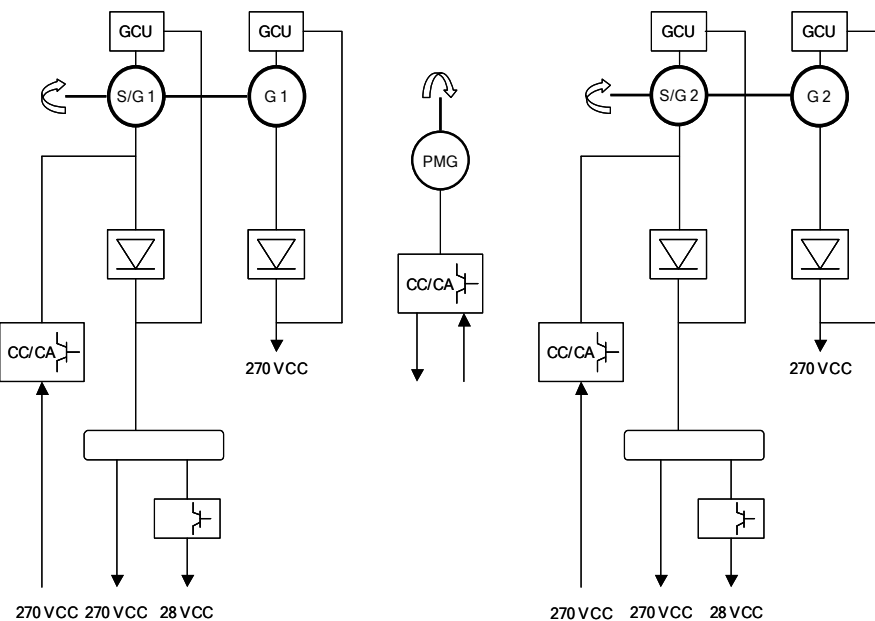
### 2.4.3 Joint Technology Initiative Clean Sky

La iniciativa Clean Sky es el mayor proyecto europeo de investigación y desarrollo de nuevas tecnologías en el sector aeronáutico. Este proyecto está incluido dentro del “VII Programa Marco”. El programa tiene una duración prevista de seis años desde 2007 a 2013, y un presupuesto de 1.700 millones de euros. Entre las empresas que participan en el proyecto se pueden destacar: Airbus, Alenia Aeronáutica, Dassault Aviation, Eurocopter, Liebherr-Aerospace, Rolls-Royce, Safran y Thales. Estas empresas lideran los diferentes líneas de investigación. Entre las empresas españolas que han decidido participar, en este ambicioso proyecto, destacan EADS, ITP, Cesa, Indra, GMV y Sener. Una de las líneas de investigación es el uso de sistemas y equipos totalmente eléctricos. Esto permite la utilización de la energía de una forma más eficiente, gracias a la

generación y distribución que se hace de la potencia eléctrica en el nuevo concepto de avión, evitando las conversiones no necesarias [CleanSky07].

El objetivo final de Clean Sky es que las nuevas aeronaves que desarrolle la industria cumplan con los objetivos fijados por el Consejo Asesor de Investigación Aeronáutica en Europa (Acare) para 2020, que incluyen un recorte del 50% en emisiones de CO<sub>2</sub>, del 80% en las de óxidos de nitrógeno, y la reducción de emisión de ruidos de las aeronaves.

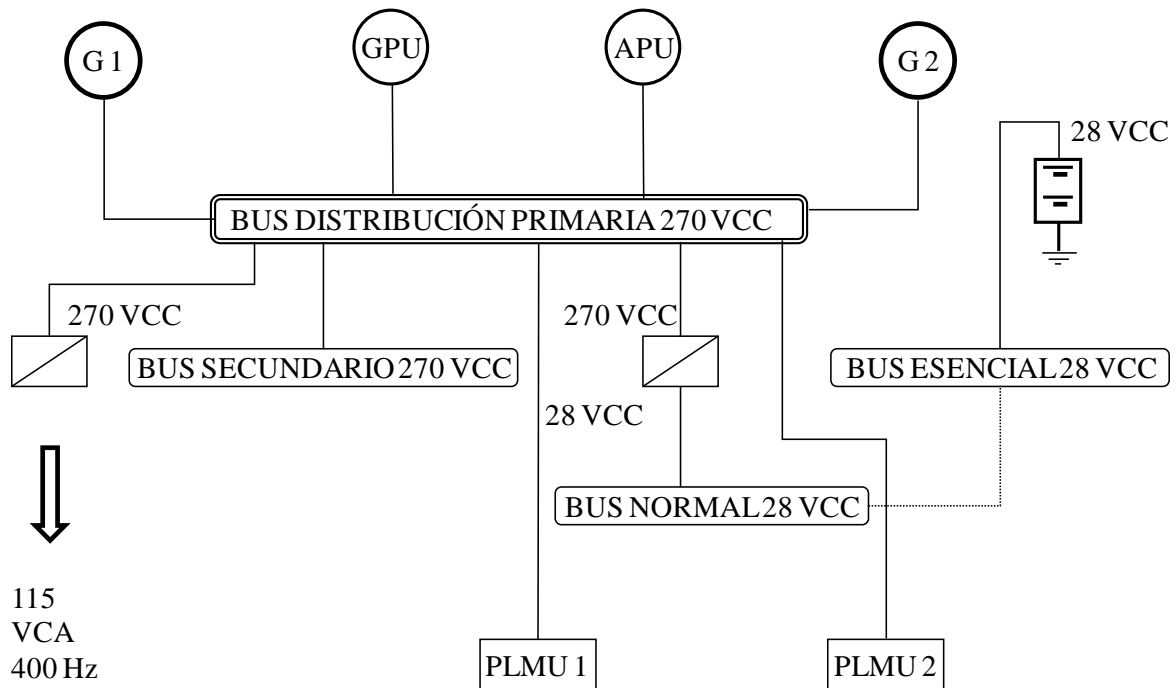
Dentro del programa Clean Sky, actualmente se está desarrollando un avión demostrador basado en la plataforma del ATR 72 que se muestra en la Figura 2.28. En este caso existen dos pares de arrancador/generador y generador, conectados cada uno a un eje, para proporcionar la energía eléctrica al sistema. La potencia generada es a 115 V<sub>CA</sub> y se controla mediante cuatro unidades GCU. La alimentación del sistema con tensiones de 270 V<sub>CC</sub> y 28 V<sub>CC</sub> se consigue mediante rectificadores y convertidores, respectivamente. También presenta la posibilidad de obtener energía de 115 V<sub>CA</sub> a partir de una tensión de 270 V<sub>CC</sub> mediante inversores CC/CA. En caso necesario, se puede obtener energía además desde un generador (PMG) conectado a un tercer eje [CleanSky07].



**Figura 2.28: Esquema simplificado del ATR 72**

#### 2.4.4 HV270DC

En línea con las actividades del avión más eléctrico EADS está desarrollando desde finales de 2005 una arquitectura de distribución a 270 V<sub>CC</sub>. Este programa finaliza en el año 2012. El sistema ha sido integrado por EADS pretendiendo dar a conocer las ventajas y problemas que presentan los nuevos sistemas de distribución de potencia eléctrica de alta tensión, en comparación con los sistemas de distribución convencionales. El principal objetivo de este proyecto tecnológico es integrar los componentes de un SDPE de un avión más eléctrico, y comprobar en un entorno de laboratorio, la funcionalidad de los mismos. Para ello se ha desarrollado una posible arquitectura de distribución aplicable a este concepto de avión [Izquierdo10].



**Figura 2.29: Arquitectura HV270DC**

La parte de generación se compone de dos generadores, una GPU y una APU de 270 V<sub>CC</sub>, con el apoyo de una batería Li-Ion de 28 V<sub>CC</sub>. La energía eléctrica en alta tensión, aportada por los generadores, la GPU en tierra o la APU durante el vuelo, se distribuye desde un bus primario de 270 V<sub>CC</sub> con configuración en anillo. Desde este bus primario se lleva energía directamente a un bus secundario de 270 V<sub>CC</sub> y a dos unidades de

distribución secundaria, denominadas PLMU (*Power Load Management Unit*), constituidas por SSPC, y que están encargadas de proporcionar la alimentación a las cargas de 270 V<sub>CC</sub> y 28 V<sub>CC</sub>. Por medio de equipos de conversión se obtiene también energía eléctrica de 115 V<sub>CA</sub> (400Hz) y de 28 V<sub>CC</sub>. Con los 28 V<sub>CC</sub> se energiza un bus normal de 28 V<sub>CC</sub> que a su vez está conectado a un bus esencial del mismo nivel de tensión. El bus esencial puede recibir energía tanto desde el convertidor CC/CC como desde la batería, en caso necesario. Este sistema APU está basado en pilas de combustibles alimentadas con hidrógeno [Sanchez10].

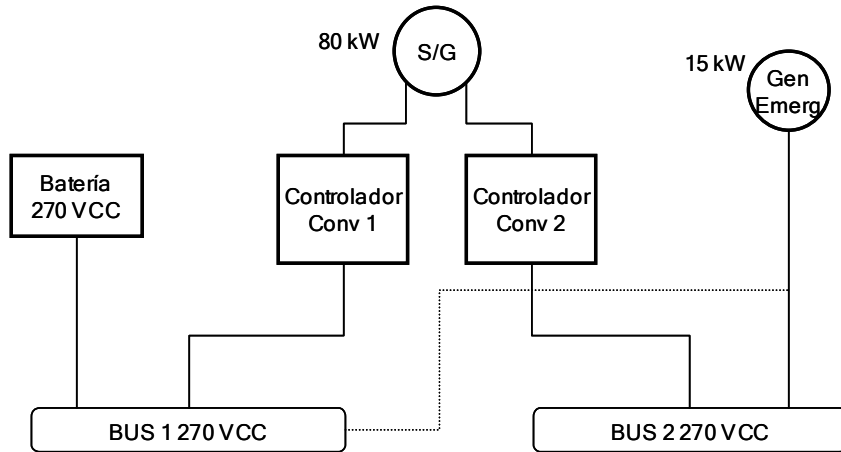
#### 2.4.5 MADMEL

EL proyecto MADMEL denominado así por sus designación en ingles *Power Management and Distribution System for a More Electric Aircraft*, fue llevado a cabo por la División de aviones Militares de Northrop/Grumman. En este programa se diseñó, desarrolló y demostró un SDPE avanzado para un avión totalmente eléctrico, dentro de un laboratorio. El proyecto se realizo en cinco fases, desde el año 1991 hasta el año 1997, durante las cuales la simulación ha sido un elemento clave para especificar el sistema y definir los requisitos a cumplir por el sistema de distribución [Maldona97] .

#### 2.4.6 Otros demostradores

Dentro de las iniciativas tecnológicas se pueden señalar los siguientes demostradores:

- El AFTI F-16 es la base de los ensayos en vuelo para los sistemas integrados del programa JSF. Se trata de una modificación del avión para incluir la arquitectura de 270 V<sub>CC</sub> que se indica en la Figura 2.30. El sistema obtiene energía mediante un generador que entrega 80 kW y que alimenta dos buses de 270 V<sub>CC</sub> a través de sendos controladores de conversión. Además, una batería de 270 V<sub>CC</sub> puede proporcionar también energía a una de esos buses, y un generador de emergencia, por su parte, al otro. Desde los buses de 270 V<sub>CC</sub> se obtienen la potencia eléctrica para los buses de distribución y las grandes cargas [Moir08].



**Figura 2.30: Sistema 270 V<sub>CC</sub> simplificado del AFTI F-16**

- Boeing junto con los socios industriales europeos ha desarrollado un avión demostrador de hélice monoplaza, propulsado únicamente por una pila de combustible y baterías ligeras de Ión-Litio. La fase de integración, de los sistemas del Avión Demostrador de Pila de Combustible, fue iniciada en 2003 en el Centro Europeo de I+T de Boeing en Madrid. El demostrador de Boeing utiliza un sistema híbrido de potencia, compuesto por una pila de combustible y una batería de Ión-Litio que suministra energía a un motor eléctrico, el cual está acoplado a una hélice convencional. La pila de combustible proporciona toda la energía para la fase de crucero. Durante el despegue y ascenso, la parte del vuelo que requiere más potencia, el sistema recurre a las baterías ligeras de Ión-Litio [Friend03].

## **2.5 Referencias**

- [Allen04] Allen J. Lockyer et al. "Power systems and requirements for integration of smart structures into aircraft" SAGE Publications, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 15, No. 4, 305-315, 2004.
- [AMC05] AMC-Plane Talk. Aeronautical Radio INC. Maryland (United States). Industry Highlights. "Electrical Protection Devices". Volume XVI, N.º 2. February 2005.
- [Andreu09] F. Andreu, D. Izquierdo. "General Systems. Electrical System General Description" Sesiones 1 a 4. Master en Integración de Sistemas de Aeronaves. EADS 2009.
- [Barrado10] A. Barrado. "Power Electronics" Session 3. Master en Integración de Sistemas de Aeronaves. UC3M 2010.
- [Blanding06] Blanding, D., "Subsystem Design and Integration for the More Electric Aircraft". Proc. ICAS 2006.
- [Bygate90] J. E. Bygate. "Aircraft Electrical System. Single and Twin Engine". Jeppesen Sanderson Training Products, 1990. ISBN: 0-89100-357-6.
- [C295AD07] "C295 Aircraft Definition". EADS Military Transport Aircraft, July 2007. Web available: <http://www.c-295.ca/images/documentation/C-295-aircraft-definition.pdf>
- [C295TR07] "C295 Technical Review". EADS Military Transport Aircraft, July 2007. Web available: <http://www.c-295.ca/images/documentation/C-295-technical-review.pdf>
- [CleanSky07] "Second ACARE opinion on the JTI Clean Sky" – 27 Feb 2007. Advisory Council for Aeronautics Research in Europe. Web available: [www.acare4europe.org/documents/ACAREJTassessmentexecutivesummaryv2.pdf](http://www.acare4europe.org/documents/ACAREJTassessmentexecutivesummaryv2.pdf)
- [CN235] "Preliminary Aircraft Evaluation for SASEB. EADS CASA CN-235". BLM National Aviation Office. Web available: <http://www.nifc.gov/aviation/SASEB/CN235Report.pdf>
- [Cotton08] I. Cotton, M. Husband; "Higher Voltage Aircraft Power Systems". IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, February 2008.

- [Doyle00] Doyle, D. D., “F-15 Secondary Power Systems Topic Area: Sub-Systems”. AGING AIRCRAFT 2000.
- [Emadi00] Emadi, K.; Ehsani, M.; “Aircraft power systems: technology, state of the art, and future trends”. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE Volume 15, Issue 1, Jan. 2000.
- [Eurofighter] [http://www.mil.no/multimedia/archive/00089/2\\_Eurofighter\\_capabi\\_89302a.pdf](http://www.mil.no/multimedia/archive/00089/2_Eurofighter_capabi_89302a.pdf)
- [Faleiro06] Faleiro, L. F., “Trends Towards a More Electrical Aircraft”, Proc. ICAS 2006.
- [Friend03] Friend, M. G. and Daggett, D. L., “Fuel Cell Demonstrator Airplane” AIAA/ICAS International Air and Space Symposium and Exposition: Dayton, Ohio. 14-17 Julio 2003.
- [Han06] Liqiu Han, Jiabin Wang and David Howe ” Small-signal Stability Studies of 270V DC Power System for More Electric Aircraft Employing Switched Reluctance Generator Technology” 25th International Congress of the Aeronautical Sciences ICAS 2006.
- [Howse03] Howse, M., “All Electric Aircraft”, Power Engineer, Volume 17, 2003: 35-37.
- [Izquierdo08] D. Izquierdo, A. Barrado, C. Raga, M. Sanz, P. Zumel, A. Lázaro. “Protection devices for aircraft electrical power distribution systems: a Survey” Industrial Electronics Society, 2008. IECON 2008. 35th Annual Conference of IEEE. Orlando November 11-13, 2008.
- [Izquierdo10] D. Izquierdo, R. Azcona, F. J. López del Cerro, C. Fernández, B. Delicado. “Electrical Power Distribution System (HV270DC), for Application in More Electric Aircraft”. Applied Power Electronics Conference and Exposition 2010. APEC '10. 25<sup>th</sup> Annual, 20-23 February 2010.
- [Kankam01] Kankam, M. D., “A Survey of Power Electronics Applications in Aerospace Technologies”. 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference cosponsored by the ASME, IEEE, AIChE, ANS, SAE, and AIAA Savannah, Georgia, July 29-August 2, 2001.
- [Lázaro01] E. Lázaro Sánchez, R. Sanjurjo Navarro. “El Sistema Eléctrico de los Aviones”. Madrid: Fundación Aena, 2001. ISBN: 84-95567-06-7.



- [Lombard94] D. A. Lombardo. “Sistemas de Aeronaves. Conozca a fondo su avión”. Madrid: Paraninfo, 1994. ISBN: 84-283-2107-8.
- [Lopez10] D. López del Moral, A. Barrado, D. Izquierdo, M. Sanz y J. Vázquez. “Estado de la técnica sobre arcos eléctricos en el entorno aeronáutico”. Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación. SAAEI 2010
- [Maldona97] Maldonado, M. A. et al., “Power Management and Distribution System for a More Electric Aircraft (MADMEL) – Program Status”. Intersociety Energy Conversion Engineering Conf., August 1997: 274-279.
- [MOET04] Framework VI: Integrated Projects. More Open Electrical Technologies (MOET). [Ref. Created on October 18, 2004]. Web available: [http://www.aerosme.com/download/WorkshopFP6Call3/abstracts/MOET\\_181004.pdf](http://www.aerosme.com/download/WorkshopFP6Call3/abstracts/MOET_181004.pdf)
- [Moir08] Moir, Ian; Seabridge, Allan. “Aircraft Systems: Mechanical, Electrical and Avionics Subsystems Integration”. 3<sup>rd</sup> ed. Chichester (West Sussex): Wiley, 2008. 546 p. Aerospace Series. ISBN: 978-0-470-05996-8.
- [MS704] “MIL-STD-704, Aircraft Electric Power Characteristics”, Military Standard.
- [Pallet87] E.H.J. Pallett; “Aircraft Electrical Systems (Hardcover)”. Ed. PEARSON Prentice-HALL, 1987.
- [Partel03] Walter W. Partel. “Aircraft Energy Systems Management Method”. The Boeing Company. Patent Number: 6636786 B2. United States Patent. 21 October 2003.
- [Plaza00] Plaza Fernández, M. “Electricidad en los aviones”. 5<sup>a</sup> Edición. Madrid,España: Ed. Paraninfo, 2000.
- [RD160] “Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment”. RTCA/DO-160E, RTCA Inc. December 9, 2004.
- [Rosero07] Rosero, J. A.; Ortega, J. A.; Aldabas, E. and Romeral, L., “Moving Towards a More Electric Aircraft”. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE Volume 22, Issue 3, March 2007.
- [Sanchez10] J. M. Sánchez, G. Sospedra, A. García, S. Barceló, B. Montesinos, A. Camina, M. Sierra, D. Izquierdo, R. Azcona, F. López del Cerro, V.

Valdivia, A. Barrado, A. Lázaro; "Unidad de potencia auxiliar basada en pila de combustible y baterías avanzadas para un sistema eléctrico de avión de 270VDC"; IV Congreso Nacional de Pilas de Combustible CONAPPICE 2010.

[Spitzer84] Spitzer, C. R., "The All-Electric Aircraft: A System's View and Proposed NASA Research Programs", NASA Langley Research Center. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions. Volume AES-20, Issue 3. May 1984: 261-266.

[TEAMJSF] A09-26602S001. Lockheed Martin, Northrop Grumman, Bae Systems, Pratt & Whitney, GE Rolls-Royce Fighter Engine Team. Web available: <http://www.teamjsf.com>

# Capítulo 3

## **3. ESTADO DE LA TÉCNICA DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN Y DEL CONTROLADOR DE POTENCIA DE ESTADO SÓLIDO (SSPC)**



ÍNDICE CAPÍTULO 3

---

3.1	INTRODUCCIÓN .....	73
3.2	DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS .....	74
3.2.1	<i>Fusibles</i> .....	74
3.2.2	<i>Circuitos interruptores (CB)</i> .....	76
3.2.3	<i>Circuitos interruptores con detector de fallo por arco (AFCB)</i> .....	78
3.2.4	<i>Circuitos interruptores con control remoto (RCCB)</i> .....	79
3.2.5	<i>Controladores de potencia de estado sólido (SSPC)</i> .....	80
3.2.6	<i>Comparativa entre dispositivos de protección</i> .....	83
3.3	ANTECEDENTES DE LOS SSPC.....	85
3.4	ESTRUCTURA DE LOS CONTROLADORES DE ESTADO SÓLIDO DE POTENCIA .....	90
3.5	PUBLICACIONES, PATENTES Y FABRICANTES .....	92
3.5.1	<i>Patentes relacionadas con el diseño del SSPC</i> .....	95
3.5.2	<i>Patentes relacionadas con la aplicación del SSPC a nivel de sistema</i> .....	99
3.5.3	<i>Fabricantes</i> .....	105
3.6	PROBLEMAS DETECTADOS EN LOS SSPC.....	107
3.6.1	<i>Falsas alarmas</i> .....	107
3.6.2	<i>Inestabilidades del sistema</i> .....	107
3.6.3	<i>Problemas ante perturbaciones EMI</i> .....	108
3.6.4	<i>Problemas en la conexión y desconexión de cargas capacitivas e inductivas</i> .....	108
3.6.5	<i>Falta de aislamiento galvánico de los SSPC</i> .....	109
3.6.6	<i>Limitaciones en la tecnología del semiconductor principal del SSPC</i> .....	109
3.7	CONCLUSIONES .....	111
3.8	REFERENCIAS .....	112



### 3.1 Introducción

Como se ha explicado en el capítulo 2, existe una clara diferencia entre los sistemas eléctricos convencionales embarcados en avión y los nuevos desarrollos, tanto en el campo de aviones militares como en el de los aviones civiles. Esto conlleva ciertas limitaciones en algunos de los componentes utilizados en los SDPE convencionales, uno de los elementos que presenta problemas son las protecciones empleadas para proteger el cableado y los equipos.

En este capítulo 3, se detallan las principales características de los elementos convencionales usados en la protección en los SDPE embarcados, y los nuevos componentes de reciente aplicación, como son los controladores de potencia de estado sólido, SSPC (*solid state power controllers*). En resumen, en este capítulo:

- Se describen las principales características de cada uno de los dispositivos de protección usados hasta la fecha en los aviones convencionales. Además, se enumeran las ventajas e inconvenientes de los diferentes componentes.
- Se introducen los antecedentes y la estructura interna del SSPC, detallando cada una de las partes en las que está dividido el dispositivo de protección.
- Se detallan los diferentes campos de aplicación que tiene el SSPC dentro de los sistemas de distribución de potencia, a nivel de componente y a nivel de sistema. Por otro lado, se enumeran los diferentes fabricantes de SSPC y patentes relacionadas.
- Finalmente, se presentan las limitaciones y problemas de funcionamiento de los SSPC detectadas hasta la fecha, en las diferentes aplicaciones donde se han utilizado.

## 3.2 Dispositivos de protección de los sistemas eléctricos

Dentro del análisis de los SDPE, uno de los elementos más estudiados son las protecciones empleadas, ya que se trata de dispositivos fundamentales a la hora de garantizar la seguridad en vuelo. En general, el principal objetivo de una protección es el de evitar daños por sobrecalentamientos o sobrecorrientes que puedan afectar al sistema de cableado y equipos. De este modo, ante una situación anormal, en la que se produzca una corriente excesiva debida a un cortocircuito, si no se detecta ésta y se corrige, puede llegarse a fundir el aislante de los cables y producirse incluso daños en los circuitos y equipos próximos, pudiendo llegar a desencadenarse un incendio dentro del avión.

Como se ha presentado en el capítulo 2, existen diferentes tipos de protecciones, desde los convencionales fusibles y *circuit breakers* (CB), ó los CB con protección ante fallo por arco ó control remoto, hasta los nuevos sistemas de protección como son los SSPC, constituidos a partir de tecnología de estado sólido [AMC05]. En los siguientes apartados se detallan las principales características de cada uno de ellos.

### 3.2.1 Fusibles

Los fusibles son dispositivos térmicos de protección que tienen un elemento metálico fabricado en algún tipo de aleación con bajo punto de fusión. Este elemento metálico se funde al aumentar su temperatura como consecuencia de la presencia de cortocircuitos o sobrecargas de corriente, protegiendo así el cableado y los sistemas aguas abajo.

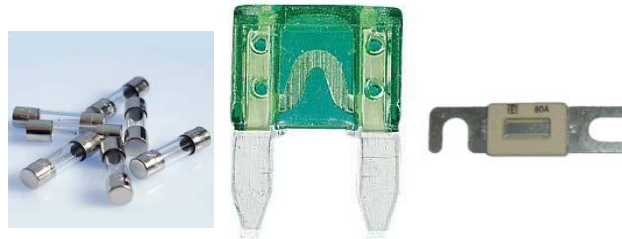
Se pueden encontrar tres tipos básicos de fusibles empleados normalmente en aviación:

- Fusibles de cartucho (con la designación en ingles, *cartridge fuses*), que consisten en un tubo de cristal o cuerpo cerámico, dos terminales conductores y un elemento fusible que puede ser de hilo de cobre, plata, etc.
- Fusibles de alta capacidad de ruptura (con las siglas en ingles HRC), los cuales son del tipo de cartucho. Son más robustos, no producen llama al fundirse, son más precisos, de operación rápida, no afectados por la temperatura ambiente, etc.



- Fusibles limitadores de corriente, que están diseñados para limitar la corriente a un valor determinado.

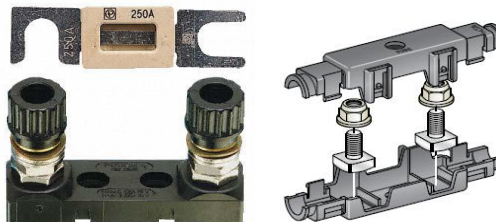
En la Figura 3.1 se muestran algunos ejemplos de fusibles. En la actualidad los fusibles calibrados suelen ser de un hilo fino, o lámina, de cobre, zinc o de aleación de plata, encapsulados o protegidos para evitar la dispersión del material al exterior en caso de fusión.



**Figura 3.1: Fusibles fabricados por MTA©**

Aunque el uso de los fusibles está muy extendido debido a su sencillez, bajo coste, pequeño tamaño y gran ligereza, presentan varias limitaciones ya que les influyen las condiciones de temperatura ambiental. Además, los fusibles no permiten la monitorización, son de respuesta relativamente lenta y no son reutilizables, es decir es necesario disponer de repuestos en los aviones.

Por otro lado, los fusibles se pueden situar en soportes porta fusibles o en cajas porta fusibles que contienen uno o más fusibles, facilitando así su colocación y protección, así como su localización y manejo en operaciones de supervisión o sustitución.



**Figura 3.2: Soportes porta fusibles fabricados por MTA ©**

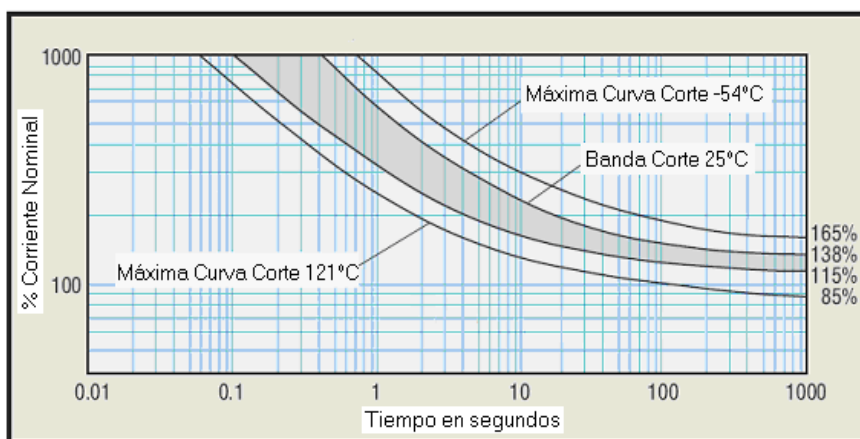
En la Figura 3.2 y en la Figura 3.3 se muestran algunos modelos de soportes y de cajas porta fusibles fabricados por la empresa MTA y por la compañía Bep Marine respectivamente. Este elemento supone peso y volumen adicional a la protección.



**Figura 3.3: Cajas porta fusibles fabricadas por Bep Marine ©**

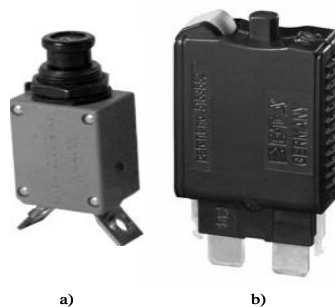
### 3.2.2 Circuitos interruptores (CB)

El CB está constituido por una serie de contactos que se encuentran cerrados mientras el circuito se encuentra en su estado normal de funcionamiento. La parte bimetálica del CB activa el mecanismo que abre los contactos cuando se produce una sobrecarga, si ésta se prolonga durante un determinado tiempo. La corriente que atraviesa el CB provoca una cierta variación de temperatura en el elemento bimetálico. Cuando dicha temperatura alcanza un cierto nivel, se produce la apertura, ver Figura 3.4, de este modo el CB realiza las funciones de protección frente a sobrecargas.



**Figura 3.4: Curva típica de sobrecarga Corriente nominal-Tiempo para CB**

Al activarse el mecanismo sobresale un pulsador, que indica que el dispositivo se ha disparado y es posible volver a la condición normal, presionando el pulsador, una vez que se ha solucionado el problema, ver Figura 3.5. Al contrario que los fusibles, el CB es reutilizable, pero requieren un plus de accesibilidad y espacio para poder accionar el pulsador y reactivar así la protección. Además, en estos elementos se puede realizar el disparo manual para aislar el circuito en cuestión, por ejemplo, en operaciones de mantenimiento. Sin embargo, es importante tener en cuenta que un intento de reenganche del propio CB puede agravar el daño eléctrico, ya que la reconexión puede provocar la propagación de la sobrecorriente, que causo inicialmente la apertura del dispositivo, con los consiguientes riesgos de afectar a otros equipos y ocasionar incrementos de temperatura o incluso emisión de humos. Por este motivo, algunos fabricantes de aviones no autorizan la reactivación de los CB en vuelo, salvo casos muy justificados y de emergencia, en los que sea absolutamente necesario para la seguridad del vuelo [AMC05].



**Figura 3.5: CB (a) fabricado por Klixon © y CB (b) fabricado por E-T-A ©**

Aunque, el CB es un elemento de enorme utilización en los sistemas de distribución de los aviones, para distintos rangos de intensidad [AS33201], sin embargo al no tener capacidad de detección del fallo por arco, pueden producirse daños en los cables incluso fuegos, cuando se produce un fallo por arco eléctrico en un cable protegido por un CB [AMC05]. Considerando la forma de actuación de los CB, se debe tener en cuenta que la apertura de los mismos puede estar asociada no sólo a una posible sobrecarga, sino también a efectos de sobretensión causados, por ejemplo, por una mala sujeción en los terminales que consiga provocar características de arco. Además, no resultan del todo

adecuados para la protección de los nuevos sistemas debido a que pueden presentar problemas en su funcionamiento con niveles altos de tensión de CC, principalmente por las interrupciones no controladas con cargas sensibles a perturbaciones.

Se debe destacar también, que se trata de elementos de complicada monitorización, necesitando para ello equipos auxiliares, lo cual incrementa el peso y complejidad del sistema. Este hecho, junto con la mayor ligereza y simplicidad de los fusibles, hace que de momento estos últimos estén más indicados para las funciones de protección en el caso de los sistemas eléctricos embarcados en aviones no tripulados.

### 3.2.3 Circuitos interruptores con detector de fallo por arco (AFCB)

Para solucionar el problema de la detección del fallo por arco, más recientemente se han desarrollado los AFCB (*arc fault circuit breakers*), estos dispositivos incluyen pequeños componentes electrónicos, que añaden a los CB la capacidad de proteger frente a los arcos eléctricos [Spyker05] [AS5692], ver Figura 3.6.



**Figura 3.6: AFCB fabricado por E-T-A©**

Estos dispositivos, mediante una sofisticada electrónica, hacen un muestreo de la corriente en intervalos por debajo de los milisegundos contabilizando las interrupciones momentáneas del aislamiento que provocan un posterior fallo por arco. Si el número de interrupciones supera una cierta cantidad, el AFCB interrumpe el circuito evitando que se produzca el fallo crítico. A partir de la forma de onda de la corriente muestreada, y gracias al análisis de esta señal en el dominio del tiempo y la frecuencia, se hace posible la detección del fallo por arco pudiendo evitar que se repita. La identificación se basa en discriminar el fallo por arco, mediante el uso de patrones y algoritmos, de una corriente

de funcionamiento normal. Dependiendo de la complejidad de los patrones y algoritmos del AFCB, se puede llegar a diferenciar los fallos por arco de otras señales que se le asemejen, como pueden ser los transitorios durante el arranque o parada de un motor, o las demandas pulsantes de corriente del motor durante el funcionamiento normal.

A pesar del avance que representan en cuanto a la capacidad de protección frente al fallo por arco, la utilización de estos elementos se limita al ámbito de la corriente alterna en entornos muy específicos, y no aportan soluciones a la problemática de monitorización y control presente en los CB.

### 3.2.4 Circuitos interruptores con control remoto (RCCB)

Otro de los problemas que tiene el CB, es la carencia de control remoto. Para resolver esta limitación se han empezado a introducir recientemente los RCCB (*remote control circuit breakers*), ver Figura 3.7.

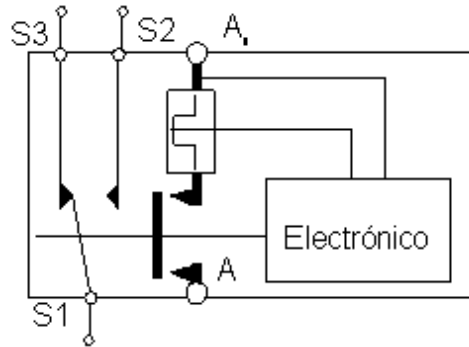


**Figura 3.7: RCCB fabricado por E-T-A**

Estos dispositivos combinan las funciones de los relés y los CB permitiendo además ser controlados de forma remota. Su empleo en el control de cargas dentro de los sistemas de distribución mejora la eficiencia de los mismos con menores pérdidas de tensión, menores costes e incluso menores pesos que los conjuntos relé más protección fusible ó CB [EATON] [E-T-A].

El sistema de conmutación está operado por circuitos electrónicos, con lo que se soluciona además el problema del envejecimiento del elemento bimetálico, ver Figura

3.8, además el dispositivo incluye contactos para la monitorización del estado del componente (S1, S2 y S3).



**Figura 3.8: Diagrama de un RCCB**

Sin embargo, no deja de ser un dispositivo de carácter mecánico, lo cual limita su empleo en sistemas de alta tensión.

### 3.2.5 Controladores de potencia de estado sólido (SSPC)

Los SSPC están constituidos a partir de tecnología de estado sólido y aparecen como consecuencia del desarrollo creciente de la microelectrónica y la electrónica de potencia. Estos dispositivos ya han sido incluidos en los recientes desarrollos de los fabricantes Airbus y Boeing, en el A-380 y en el B-787 respectivamente. El SSPC proporciona la capacidad de protección y de conmutación directamente al bus principal, mediante semiconductores de potencia, combinando las funciones de los convencionales relés y CB [AMC05] [Roy87] [Liu05] [Potter06] [Maxwell02] [Avionics05].

Como se ha descrito en los párrafos anteriores los dispositivos convencionales de protección y control de cargas presentan ciertas limitaciones de funcionamiento. Una de estas limitaciones está relacionada con los nuevos niveles de tensión introducidos en los aviones de nueva generación. Debido a ello se han desarrollado nuevos componentes que permiten la sustitución de los antiguos elementos de carácter mecánico por unos dispositivos electrónicos, como son los SSPC.

Esta sustitución permite una considerable disminución de peso y espacio, y por otro lado, hace posible adoptar nuevas arquitecturas de distribución de potencia, ya descritas anteriormente en el capítulo 2.

Los SSPC presentan algunas desventajas por el momento. No están disponibles para usar con cargas de CC por encima de los 25 A, en aplicaciones en alta tensión. En el caso de cargas de corriente alterna el rango de intensidad es bajo y muchas veces con excesiva disipación de potencia. Además, en el aspecto económico no pueden competir de momento con los conjuntos relé más CB, a los que están destinados a sustituir. Sin embargo, estos dispositivos muestran importantes ventajas por su baja disipación de potencia, su alta velocidad de respuesta, su menor susceptibilidad a las vibraciones que los dispositivos electromecánicos, su alta fiabilidad y, por supuesto, su capacidad de control remoto mediante el uso de software.



**Figura 3.9: SSPC fabricado por DDC ©**

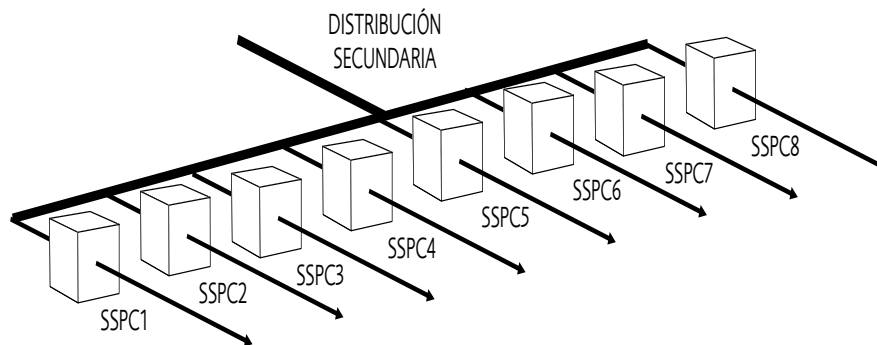
Debido al grado de integración actual de la electrónica, los SSPC presentan un tamaño reducido que permite agruparlos en módulos, ya sean equipos o tarjetas, cuyo número de SSPC está condicionado por la aplicación, ver Figura 3.9. Así pues, introduciendo la tecnología de los SSPC se puede mejorar el control de los sistemas de distribución y la protección del cableado. Además, se consideran como una opción más fiable que los métodos convencionales de conmutación y protección para cargas pequeñas y medianas en los aviones [Theisen86].

Por otro lado, esta sustitución permite una considerable disminución de la potencia disipada en los elementos de protección y conmutación, pudiendo llegar a ser seis veces inferior, ver Tabla 3.1.

	Relé	CB	SSPC
<b>Perdidas en los contactos</b>	2,5 W	3 W	1 W
<b>Perdidas en el control bobina/medida corriente</b>	3 W	2 W	0,8 W
<b>Pérdidas totales por potencia disipada</b>	<b>5,61 W</b>	<b>5 W</b>	<b>1,8 W</b>

**Tabla 3.1: Comparativa de las potencias disipadas por los relés, CB y SSPC con las mismas condiciones de operación**

Otra de las ventajas del SSPC, es que situando estos módulos físicamente cercana a las cargas, a la cual se lleva la energía eléctrica mediante un cable principal o bus de distribución, cada uno de los SSPC puede distribuir la potencia eléctrica a las cargas, mediante cables más cortos y con menor sección, reduciendo así peso y volumen con respecto a otros sistemas de protección [Potter06] [Maxwell02] [Avionics05], ver Figura 3.10.



**Figura 3.10: Distribución secundaria mediante SSPC**

En los siguientes apartados de este capítulo se incluye un estudio cronológico del estado de la técnica de los SSPC.



### 3.2.6 Comparativa entre dispositivos de protección

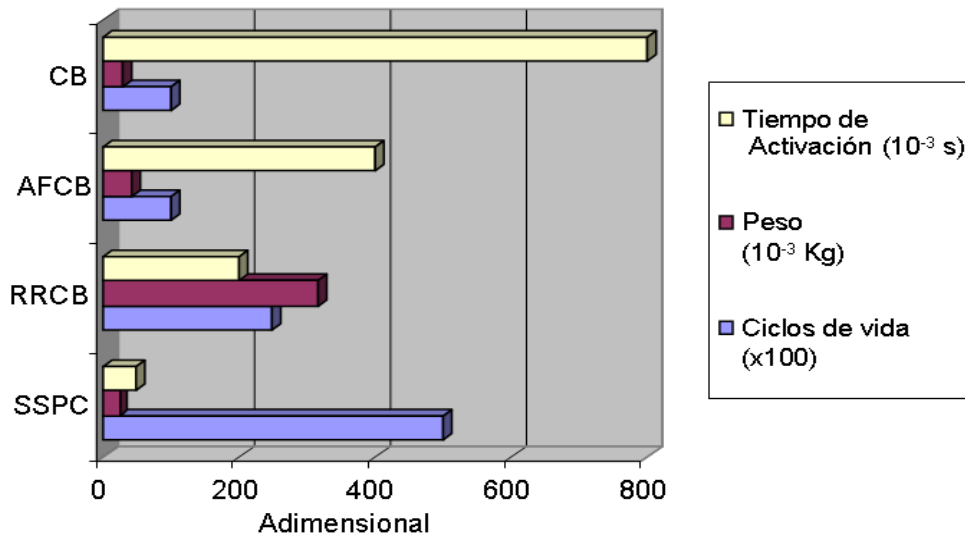
Actualmente se utilizan y se están empezando a utilizar diferentes dispositivos de protección en los sistemas eléctricos embarcados en aeronaves. En la Tabla 3.2, se recogen las características principales que presentan estos elementos de protección, de forma que pueden apreciarse las ventajas e inconvenientes que aportan unos frente a otros.

<b>Características</b>	<b>Fusible</b>	<b>CB</b>	<b>AFCB</b>	<b>RCCB</b>	<b>SSPC</b>
Control Remoto	✗	✗	✗	✓	✓
Protección frente a arco eléctrico	✗	✗	✓	✗	✓
Dispositivo Mecánico/Electrónico (M/E)	M	M	M	M/E	E
Reducción de cableado	✗	✗	✗	✓	✓
Aplicaciones 28 V <sub>CC</sub>	✓	✓	✗	✓	✓
Aplicaciones 270 V <sub>CC</sub>	✗	✗	✗	✗	✓
Coste	✓	✓	✓	✗	✗
Precisión	✗	✗	✗	✗	✓
Información de estado	✗	✗	✗	✓	✓
Compatibilidad con bus de datos	✗	✗	✗	✗	✓
Disipación de potencia	✓	✗	✗	✗	✓

**Tabla 3.2: Comparativa de las ventajas e inconvenientes de los dispositivos de protección**

Los fusibles y CB aparecen como la opción más sencilla y barata, si bien son menos precisos y no aportan protección frente al arco eléctrico. Los AFCB son más caros y pesados que los CB, pero tienen la ventaja de que aportan la capacidad de protección frente al arco, aunque, al igual que los anteriores, no pueden ser monitorizados ni conectados directamente al bus de datos del avión. Este último aspecto, resuelto ya en los RCCB, es de gran importancia por la capacidad de conexión y desconexión de cargas, así como por el ahorro de peso y volumen del cableado. Sin embargo los RCCB presentan un mayor peso y volumen, además de un mayor coste. No obstante, todos estos elementos mantienen un cierto carácter mecánico y quedan limitados funcionalmente cuando se manejan altas tensiones, por lo que presentan problemas en las aplicaciones en los sistemas de potencia eléctrica de 270 V<sub>CC</sub>.

Pese al incremento en el coste del SSPC, las ventajas que presenta el componente en peso, volumen, tiempos de activación y precisión en su actuación, son muy superiores a los elementos mecánicos, gracias a su carácter electrónico. Por otro lado, es importante señalar que tienen ciclos de vida mucho mayores que los elementos mecánicos convencionales, ver Figura 3.11.

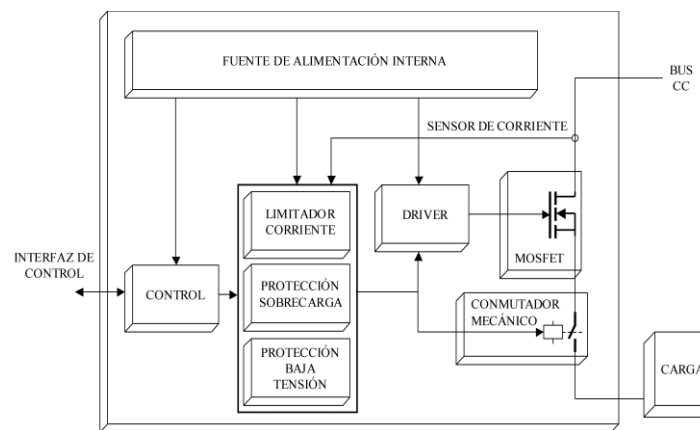


**Figura 3.11: Comparativa de algunos de los parámetros representativos de los elementos de protección actuales**

### 3.3 Antecedentes de los SSPC

Inicialmente los SSPC surgen de la combinación de las tecnologías de conmutación de cargas convencionales, contactores electromecánicos y la tecnología de estado sólido. Este nuevo desarrollo viene marcado por los incrementos sucesivos de las tensiones en los SDPE embarcados, los cuales plantean la necesidad de introducir semiconductores de potencia como elemento de control para evitar problemas durante la conmutación de las cargas conectadas aguas abajo.

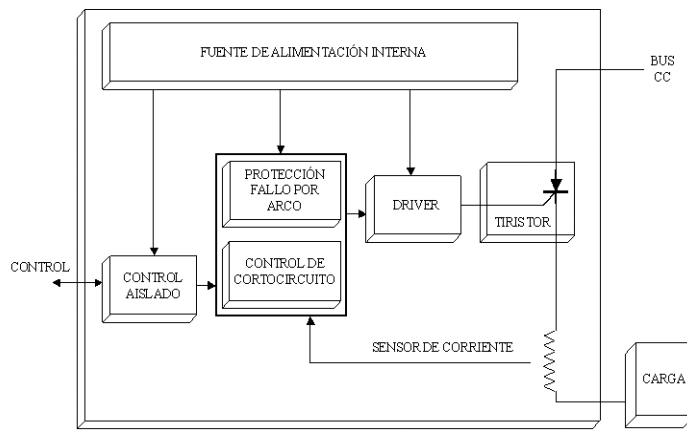
En un principio la tecnología de Estado Sólido se plantea como apoyo a los convencionales sistemas mecánicos. En [Theisen86] se presenta un interruptor híbrido para tensiones de 270 V<sub>CC</sub>, que incluye la combinación de semiconductores y contactores electromecánicos. Con estos dispositivos se logra una considerable disminución de los fallos por arco eléctrico y del efecto rebote durante las conmutaciones. Estas mejoras alargan la vida útil del componente y por tanto su fiabilidad. De este modo, como antecedentes del SSPC se puede señalar el controlador de potencia remoto, RPC (*Remote Power Controller*), que combina un semiconductor MOSFET y un contactor mecánico, ver Figura 3.12, con el objetivo de mejorar el proceso de conmutación y eliminar efectos no deseados.



**Figura 3.12: Diagrama de bloques del controlador de potencia remoto, RPC**

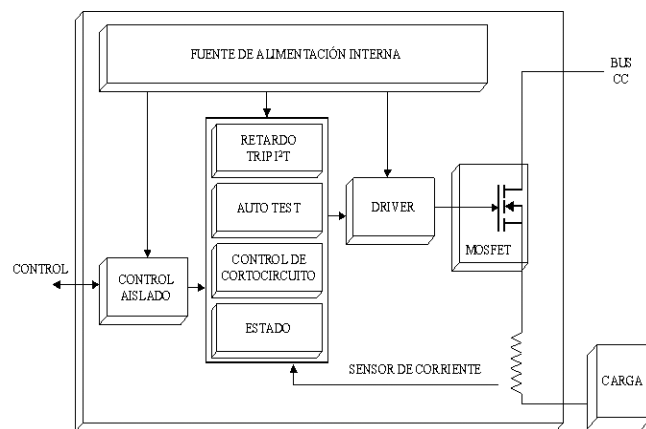
Las primeras patentes de SSPC aparecen durante la segunda mitad de la década de los 80 [Roy87] [McCollu88]. En [Roy87] ya se incluye una arquitectura con los distintos

bloques que constituyen un SSPC actual. Además, presenta la funcionalidad de control remoto de cargas y su funcionamiento como elemento de protección ante condiciones de sobrecarga. En [McCollu88], se muestra una de las nuevas capacidades de estos dispositivos, como es la limitación del arco y el efecto rebote producido en los contactos de los convencionales contactores. Cabe destacar que el SSPC estaba desarrollado a partir de tecnología de tiristores, con las limitaciones que esto supone en el control durante el proceso de apagado, ver Figura 3.13.



**Figura 3.13: Conmutador de potencia de CC de estado sólido**

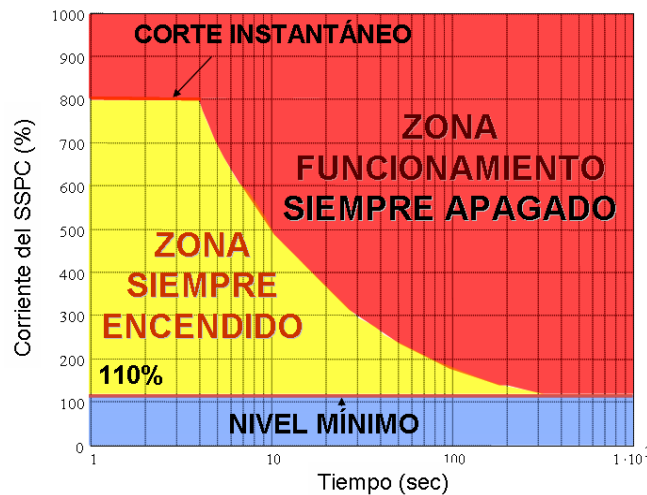
En la década de los noventa, aparecieron los primeros componentes comerciales, diseñados por el fabricante de semiconductores DDC, ver Figura 3.14 [Friedman92].



**Figura 3.14: Diagrama de bloques del SSPC fabricado por DDC**

El componente es recomendado para nuevos usos dentro de las arquitecturas de los aviones más eléctricos. Los SSPC presentados en este artículo, funcionan a tensiones de 270 V<sub>CC</sub>, con niveles de corriente hasta 15 amperios; y a tensiones de 28 V<sub>CC</sub>, con niveles de corriente de hasta 25 amperios. Por otro lado, en [Friedman99] ya se incluyen las capacidades de monitorización que permiten conocer el estado de funcionamiento en tiempo real.

La protección incluida en estos dispositivos está diseñada de acuerdo a la curva  $I^2t$ , ver Figura 3.15. La función de control remoto es muy útil, a la hora de controlar los SSPC por los centros de gestión de cargas de forma remota en tiempo real. Otros puntos a destacar de los componentes presentados son: el bajo mantenimiento, pequeño tamaño y su bajo peso.



**Figura 3.15: Curva estándar  $I^2t$  del SSPC**

En [Simon93] se considera la tecnología de los SSPC como un elemento clave para mejorar los sistemas de distribución y gestión de potencia, embarcados en las nuevas arquitecturas del avión más eléctrico. Las principales ventajas que se pueden destacar frente a los *circuit breakers* son, la rapidez en la conmutación, que puede llegar a alcanzar valores menores de 10 milisegundos, frente a los 800 milisegundos de los CB, ver Figura 3.11, y la sencillez en el control y monitorización de su estado. Otras ventajas que se

exponen en [Simon93], son su estabilidad frente a la temperatura, alta fiabilidad y el control activo de la limitación de corriente del SSPC.

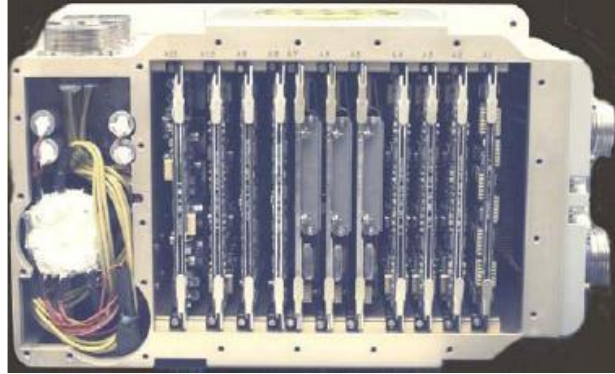
En [Label95] se presentan los resultados de los ensayos realizados sobre elementos basados en la electrónica de potencia, como son un SSPC y varios convertidores. Durante las pruebas de los componentes, se les somete a diferentes niveles de radiación ionizante o transferencia lineal de energía. El objetivo no es otro, que el de validar el funcionamiento del dispositivo en un entorno espacial. Para ello se somete al SSPC a niveles de radiación de 80 LET (Transferencia Lineal de Energía). Se comprueba que a estos niveles de radiación, el SSPC no presenta ningún efecto de mal funcionamiento. Sin embargo, ante niveles inferiores de radiación los convertidores que formaban también parte del sistema, entraban en modos no funcionales o se producían errores de apagado. Con estos ensayos se comprueba el gran potencial de uso de los SSPC en plataformas aeroespaciales, dentro de los SDPE.

En línea con este artículo, en la patente [Hart97] se describe el módulo formado por varios SSPC, para la Estación Internacional. Este módulo está constituido por dos tipos de SSPC, de modo que puede conmutar cargas a 120 V<sub>CC</sub> y 28 V<sub>CC</sub>. Estos SSPC distribuyen la potencia eléctrica a diferentes cargas, además de proteger el cableado dentro de la Estación Internacional. En esta aplicación los SSPC se encuentran programados para cuatro diferentes niveles de protección por sobrecarga. Por otro lado, estos dispositivos permiten un control remoto y transferencia de información mediante dos posibles opciones, vía bus dual de aplicación aeroespacial [MSTD1553] ó bus serie [RS232].

Asimismo, en la patente [Darty98] se incluye la idea de concentrar estos dispositivos en módulos formados por un elevado número de SSPC. Principalmente, debido al reducido tamaño y poco peso de estos componentes, así como otras funcionales descritas en los anteriores párrafos.

En [Maxwell02] se describen las ventajas que tiene un sistema de distribución y gestión de potencia configurable basado en tecnología de Estado Sólido. Estos sistemas, aplicados a los futuros diseños embarcados, presentarán una mayor fiabilidad y seguridad. Un ejemplo, es el ya citado sistema incluido en la Estación Espacial Internacional, ver

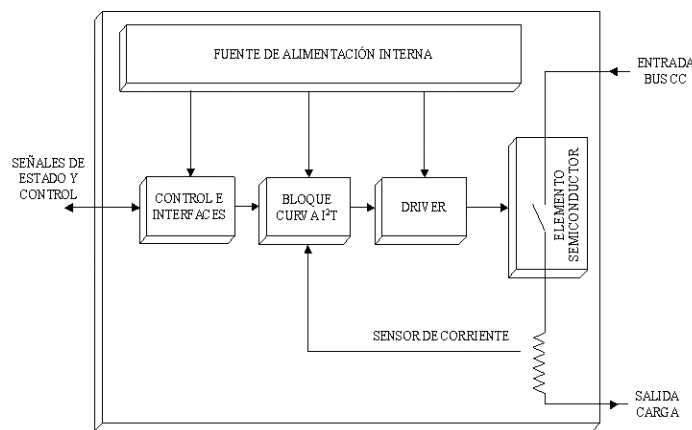
Figura 3.16, el cual permite controlar varias cargas y proteger el cableado. Cabe destacar entre sus funciones la capacidad de detección y supresión del fallo por arco así como la capacidad de detección del cableado en mal estado. Estas dos funcionalidades aportan al sistema un modo de protección frente a dos de las causas principales de daños y pérdidas de vidas en los sistemas embarcados.



**Figura 3.16: Modulo SSPC incluido en la Estación Internacional**

### 3.4 Estructura de los controladores de estado sólido de potencia

Como se ha visto en el apartado anterior, la arquitectura estándar del SSPC está dividida en cinco bloques: el dispositivo de potencia, la fuente interna de alimentación, el bloque de control e interfaces, el driver y el bloque donde se incluye la curva  $I^2t$  u otras capacidades, ver Figura 3.17 [Roy87] [McCollu88] [Potter03] [EATON] [E-T-A] [Roy87] [Potter06] [Maxwell02] [Avionics05] [Theisen86] [KwaSur94] [McCollu88] [Friedman92].



**Figura 3.17: Diagrama de bloques del SSPC**

Generalmente, el **dispositivo de potencia** controlado es un MOSFET [Roy87], aunque otra opción puede ser la implementación del SSPC con tecnología IGBT [Liu05]. Estos dispositivos de potencia posibilitan las funciones de conexión y desconexión de cargas al bus (ON: MOSFET en zona óhmica y OFF: MOSFET en zona de corte), y protegen al bus y a las cargas de posibles sobrecargas y otros efectos no deseados.

La **fuentes alimentación interna** está aislada del resto del SSPC. Su principal función es ofrecer una fuente de alimentación flotante para el resto de los bloques internos: driver, bloque de control, interfaz, etc.

El **driver** controla el encendido/apagado del MOSFET ó semiconductor, y el control de la correcta conmutación del SSPC de acuerdo con los parámetros que se incluyen en la hoja de datos del fabricante (tiempo de conexión, tiempo de apagado).



El bloque de **interfaz y control** está encargado de activar ó desactivar el estado del SSPC de forma remota. Los SSPC normalmente tienen diferentes entradas y salidas digitales de control. Por medio de estas señales, una unidad central de procesamiento externa determina, en tiempo real, lo que está sucediendo y modifica el estado del dispositivo cuando es necesario.

Los SSPC, normalmente, están programados con la **curva  $I^2t$**  que originalmente procede de las curvas de actuación de los *circuit breakers*. Considerando esto, la mayoría de fabricantes han adoptado zonas de trabajo similares:

- Protección instantánea del SSPC: corresponde a un limitador de corriente de corte instantáneo, ante un nivel máximo de corriente, el cual protege al cable, de elevadas corrientes instantáneas que puedan producirse, ver Figura 3.15.
- Protección  $I^2t$  del SSPC: basada en la curva clásica de protección de los CB, que protege al cable de un sobrecalentamiento continuo, ver Figura 3.15.
- Área normal de trabajo del SSPC: cuando la corriente está por debajo del nivel mínimo y todas las protecciones no están actuando, ver Figura 3.15.

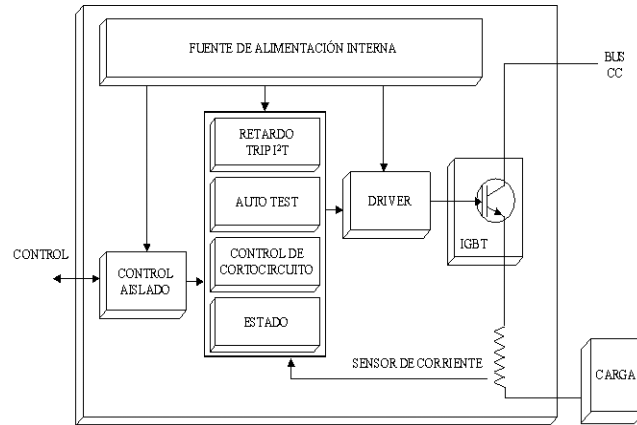
### 3.5 Publicaciones, patentes y fabricantes

Con la evolución del componente, se han añadido nuevas funcionalidades orientadas a los SDPE embarcados, las cuales han sido recogidas en diferentes patentes y publicaciones de carácter científico, las cuales se detallan en los siguientes párrafos.

En [Mussma03] se presenta una nueva técnica para tratar la conexión de grandes cargas capacitivas, usando un SSPC digital (DSSPC) con limitación de corriente por "foldback". Con lo que en la conmutación de las cargas se limita y controla activamente la corriente máxima suministrada a la carga. De esta forma, cuando se conmuta una carga la corriente está limitada a un 20% por encima de la corriente nominal. El control activo hace que la corriente suministrada por el SSPC durante el encendido, sea inversamente proporcional a la tensión en el elemento aguas abajo del SSPC. Por otro lado el DSSPC, mediante la monitorización de las desviaciones de la carga de los perfiles grabados, puede llegar a predecir y detectar fallos por arcos. En línea con lo anterior, en [Mussma04] se muestran las ventajas de incluir en el SSPC un AFCI (*arc fault circuit interruptor*) que permite diferenciar el fallo por arco de las condiciones normales de operación e interrumpir este suceso antes de que se produzcan daños. El hardware consiste en una o más sondas procesadas por un circuito simple y algún algoritmo de software incluido en un microcontrolador.

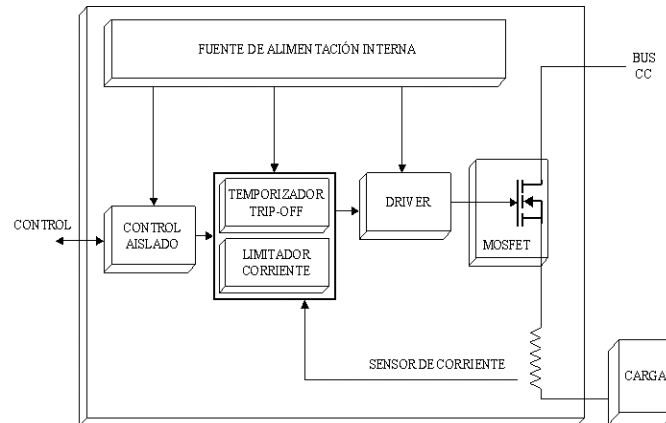
Como ya se ha mencionado, normalmente los SSPC se implementan a partir de semiconductores de tecnología FET. Este tipo de tecnología presenta algunos problemas, todavía no resueltos, relacionados con la limitación de corriente. Debido a ello el empleo de estos dispositivos para aplicaciones en arquitecturas de 270 V<sub>CC</sub> se encuentra restringido a corrientes de hasta 25 A. En [Liu05] se muestra como alternativa la implementación de un SSPC mediante el uso de tecnología IGBT, ver Figura 3.18. Esta tecnología presenta una menor tensión de caída entre sus bornes, una reducción de las pérdidas y tiene un menor coste, si se compara con la tecnología CoolMOS, cuando son utilizados en aplicaciones donde se usan tensiones y corrientes elevadas. Teniendo en

cuenta estos factores se propone este tipo de tecnología como la más adecuada para las aplicaciones de gran corriente y elevadas tensiones, 50 Amperios/270 V<sub>CC</sub>.



**Figura 3.18: Diagrama de bloques de SSPC implementado con IGBT**

Debido a la reciente aplicación del SSPC, en comparación con otras protecciones convencionales ya implantadas en los sistemas embarcados, han aparecido continuas mejoras en los últimos años. Estos avances han conseguido un dispositivo cada vez más robusto y con un campo de aplicación más amplio, como puede verse en [Beneditz06] y [Henderson06], descritas en el epígrafe 3.5.1.

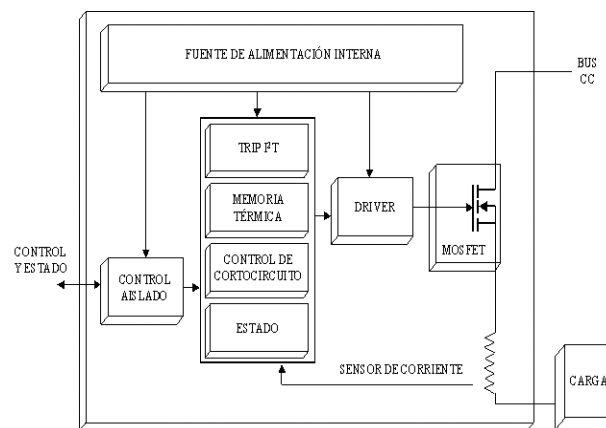


**Figura 3.19: Diagrama de bloques de SSPC con limitador de corriente**

En [Komatsu07] se presenta un SSPC con limitador de corriente, que puede ser empleado en aplicaciones espaciales. Este dispositivo permite evitar problemas por elevados picos de corriente durante la conexión de cargas o posibles cortocircuitos aguas abajo del

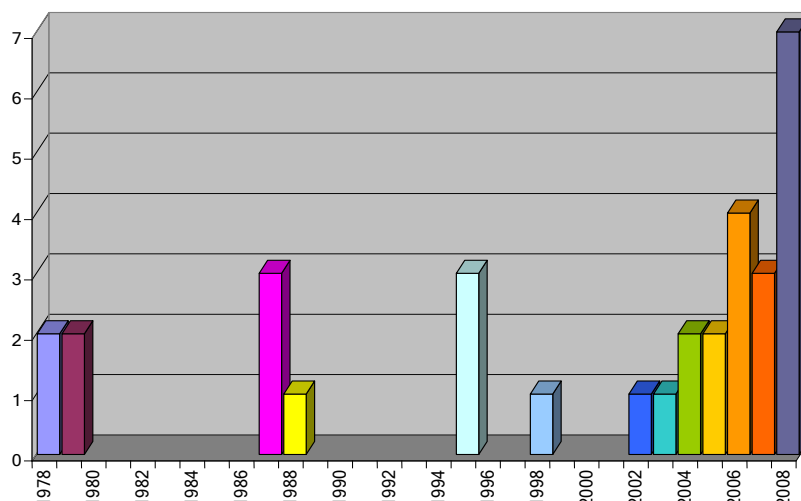
SSPC. También, evita la transmisión a la red de distribución de posibles perturbaciones de tensión y corriente, ver Figura 3.19. Es importante señalar que el SSPC presenta la ventaja de que no sólo actúa como un interruptor (ON/OFF), sino que además, tiene la capacidad de permitir el paso de corrientes elevadas durante un cierto tiempo antes de interrumpir el paso de corriente.

En [Barrado08] se presenta un modelo genérico de SSPC que incluye, dentro del componente, el efecto de memoria térmica y la compensación de la curva  $I^2t$  por la disipación térmica producida en el cableado, ver Figura 3.20. Además, el modelo permite la posibilidad de variar la temperatura ambiental, en función de la ubicación del componente y del cableado al que protege. También es configurable para ser adaptado a los parámetros de las hojas de características de los fabricantes, incluyendo los siguientes parámetros: curva  $I^2t$ , nivel de protección instantánea y respuesta dinámica.



**Figura 3.20: Diagrama de bloques de SSPC con efecto memoria térmica**

Un claro indicador del índice de investigación de los SSPC, es el número de patentes que han aparecido recientemente. En la Figura 3.21 se muestra un gráfico con la evolución en cuanto al número de publicaciones de patentes en los últimos años, desde la aparición de las primeras patentes de los SSPC [Roy87] [McCollu88]. Cabe destacar el hecho de que la tendencia en el aumento del número de patentes sea más acusada en la última década. Este incremento es consecuencia del esfuerzo por aplicar esta tecnología en el campo de los nuevos sistemas eléctricos embarcados, para las cuales los SSPC presentan considerables ventajas frente a otros dispositivos convencionales ya mencionados.



**Figura 3.21: Evolución en la publicación de patentes relacionadas con el SSPC**

En los siguientes párrafos se describen algunas patentes directamente relacionadas con los SSPC, según dos líneas distintas de interés: diseño del dispositivo y aplicación dentro del sistema.

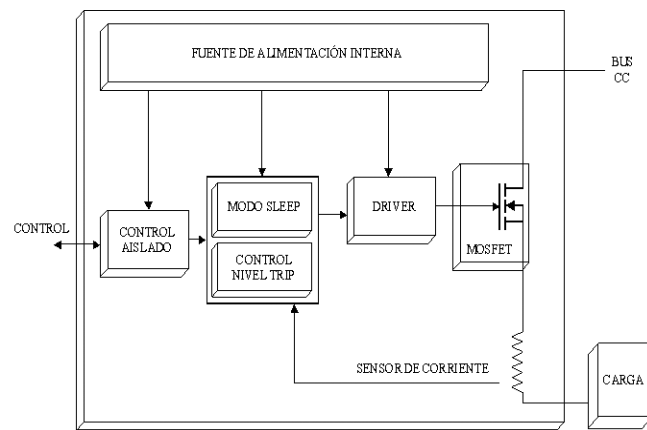
### 3.5.1 Patentes relacionadas con el diseño del SSPC

En [Parkinson95] se presenta un diseño del SSPC en la que se contempla la posibilidad de incluir, como parte del circuito integrado del mismo, un control lógico del SSPC que proporciona **capacidad de reinicio automático**, en respuesta a condiciones de sobrecorriente causadas por el arranque de una gran carga eléctrica conectada. De esta forma, se evitan los cortes indeseados de potencia que pueden presentarse cuando se emplean en el sistema ciertos tipos de cargas eléctricas, que suponen altas corrientes en el encendido como parte de su funcionamiento normal, por ejemplo, algunos motores en la aceleración de arranque o algunas lámparas de filamento durante el calentamiento de la misma.

En [Lazarovich04] describe la aplicación del SSPC como un dispositivo capaz de **detectar y proteger al cableado del fallo por arco**. Gracias a los circuitos internos del SSPC es posible mantener bajo control la corriente demandada por la carga, durante sus diferentes condiciones de funcionamiento. Así pues, el SSPC registra y compara las corrientes, con los datos grabados en su memoria interna. Mediante este proceso, el

dispositivo es capaz de diferenciar un fallo por arco de las corrientes suministradas a la carga durante las condiciones normales de operación. Ante la aparición continuada de un fallo por arco, el SSPC es capaz de interrumpir el suministro de potencia a la carga, dependiendo de la programación y el algoritmo incluido en el interior del SSPC.

Por otro lado, otros avances dentro de la funcionalidad de los SSPC, le permiten comportarse como si se tratase de un CB electromecánico. Para implementar la funcionalidad al completo es necesario solventar algunas diferencias, que presentan los elementos electrónicos, en comparación con los CB electromecánicos. Partiendo de esta premisa, en [Beneditz06], se presenta un SSPC con un sistema de almacenamiento de energía suficiente, para **evitar las desconexiones de la carga ante cortes ó interrupciones de la alimentación en el bus**, ver Figura 3.22, evento muy frecuente en los sistemas embarcados durante los intervalos en los cambios de un bus de distribución a otro. Este fenómeno no es problema para los CB, ya que se encuentran conectados de forma mecánica y no dependen de un control electrónico.



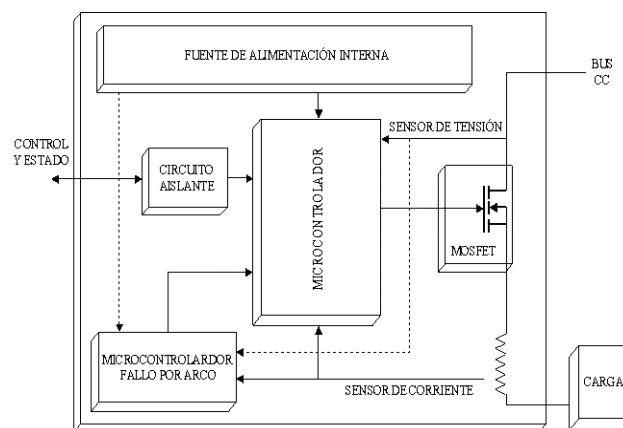
**Figura 3.22: Diagrama de bloques de SSPC con modo “sleep”**

Sin embargo, en los SSPC la falta de energía eléctrica en el control inteligente del dispositivo, puede llegar a originar que la carga se desconecte, aunque exista alimentación eléctrica aguas arriba del SSPC, tras un cambio en las barras de distribución ó microcorte de alimentación. Los nuevos dispositivos deben de ser capaces de soportar tiempos de

corte de alimentación, mediante un modo “sleep”, dentro de los límites de la normativa [Beneditz06].

Ante la apertura y cierre de un contactor, ó el apagado y reencendido de un generador, se pueden producir problemas de sobrecorrientes en el SSPC, situado aguas abajo. Esto es debido a que el SSPC permanece cerrado y el encendido de un generador en CA puede ocasionar un pico de corriente en la carga, si el SSPC no se ha abierto previamente. Para solucionar esta problemática, en [Henderson06] se presenta un SSPC, para aplicaciones en CA, que mediante un sistema de medida es posible la detección del estado de la fuente de alimentación aguas arriba del SSPC. Así, durante una falta de tensión aguas arriba, se desconecta la carga y es reconectada, sólo, cuando la fuente ha sido restablecida. Esta reconexión se realizará durante los pasos por cero de la tensión sinusoidal, de este modo, se produce un incremento gradual de la corriente, reduciendo los picos bruscos de corriente que podrían activar las propias protecciones internas del SSPC.

En la estructura del SSPC presentado en [Tofigh06], ver Figura 3.23. El conmutador de estado sólido de este SSPC tiene una entrada, a la que se encuentra acoplado un microcontrolador, y un circuito aislante para proporcionar una barrera entre el microcontrolador integrado y un conector de comunicación.

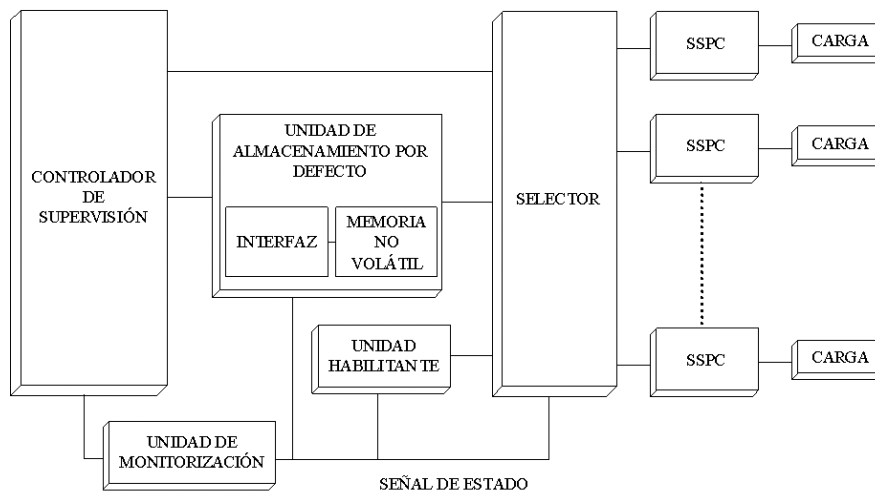


**Figura 3.23: Diagrama de bloques de SSPC con microcontroladores**

El microcontrolador es programable con las condiciones de funcionamiento iniciales, mediante una memoria no volátil, y tras la inicialización, se puede configurar mediante el

bus de comunicación. Existe tanto un sensor de tensión como uno de corriente para comprobar los parámetros de funcionamiento del dispositivo. Está configurado también para detectar sobrecorrientes y fallo por arco, con varios niveles de sensibilidad.

En [Plivcic07] se incluye la funcionalidad redundante en un control del SSPC para asegurar que cada **canal de conmutación opere de un modo seguro, de acuerdo a una configuración por defecto en caso de fallo**, ver Figura 3.24. Cada canal dispone de un dispositivo de conmutación, para la carga correspondiente, que está controlado por un controlador de supervisión. Una unidad de monitorización se encarga de seguir el comportamiento del controlador de supervisión y emitir la señal de estado correspondiente. Dicha señal de estado también puede leerse desde una unidad, que se encarga de producir la señal de habilitación de los canales cuando el conjunto entra en modo *backup*. También, se incluye una memoria no volátil que almacena los comandos por defecto de aplicación en caso de que el SSPC entre en modo seguro, por ejemplo, debido a un fallo en el controlador de supervisión.



**Figura 3.24: Control redundante con función *back-up* memorizada**

Relacionado con las tecnologías de los SSPC, en [Yu08A] se presenta un sistema que permite la detección diferencial del fallo por arco en un sistema de distribución constituido por SSPC. Para ello se incluye un nodo maestro para la detección digital de una señal de corriente y otro de tensión, que puede ser implementado conjuntamente con



el SSPC. También se introduce un nodo esclavo en otro punto del cableado para obtener señales similares. Finalmente, se añade una unidad de detección del fallo por arco en el cableado, que compara las señales de corriente y tensión obtenidas en el nodo maestro y en el nodo esclavo.

Un paso más en el desarrollo de este tipo de tecnología surge con la incorporación de los efectos de memoria térmica presentes en los dispositivos convencionales como el fusible y CB, ya citada anteriormente [Barrado08]. Así pues, en [Liu08A] se presenta un SSPC que incorpora los **efectos de memoria térmica** similar a la del propio cableado. El objetivo en este caso es, principalmente, conseguir una apropiada coordinación entre la curva de corte del SSPC y las características de una posible protección convencional asociada al mismo, como puede ser, por ejemplo, un fusible. La combinación de un fusible con un SSPC se plantea como método para obtener un grado mayor de seguridad evitando el fallo por conmutación indeseada en el MOSFET.

### 3.5.2 Patentes relacionadas con la aplicación del SSPC a nivel de sistema

El interés por el desarrollo de sistemas de distribución eléctrica aprovechando las funcionalidades del SSPC se pone de manifiesto ya en [Cronin78], donde se presenta un **circuito de control y gestión de cargas**, con el objetivo de conseguir una disminución de la alimentación de ciertas cargas que se consideren de baja prioridad en un avión, dependiendo del nivel de emergencia. Como alternativa a los circuitos lógicos asociados con relés, se plantea el empleo de SSPC para llevar a cabo la labor de conexión y desconexión de las citadas cargas de baja prioridad.

En [Darty98] se presenta una novedosa arquitectura que incluye varios **SSPC controlados por un computador central**, con el fin de gestionar un grupo de cargas, todas ellas conectadas a un SDPE embarcado. En estos módulos cada uno de los SSPC lleva incorporado un microcontrolador, el cual está interconectado mediante un bus serie digital al microprocesador central. De esta forma, estos módulos minimizan el número de interfaces. El microprocesador central redundante recibe el estado de cada uno de los

SSPC y las cargas conectadas a los mismos, permitiendo al sistema central encargarse de todo el control del SDPE.

El sistema que se presenta en [Drake02] puede tomarse como un paso intermedio respecto a lo considerado en la patente anterior [Darty98] y la que se detalla en el siguiente párrafo [Mares03]. En este caso se concibe la idea de dotar, al sistema secundario de potencia eléctrica de un avión, de la capacidad de habilitar un modo de funcionamiento de los SSPC en condiciones de pérdida de comunicación. Para ello, se describe una configuración en la que los SSPC se incluyen en una unidad de distribución secundaria de potencia (UDSP), junto con una memoria no volátil adaptada para almacenar información de la configuración de los SSPC. Además, el sistema descrito en [Drake02], dispone de una **unidad multifunción de control y visualización**, que proporciona la interfaz a través de la que se puede modificar la configuración del sistema mediante un bus de datos, ver Figura 3.25.

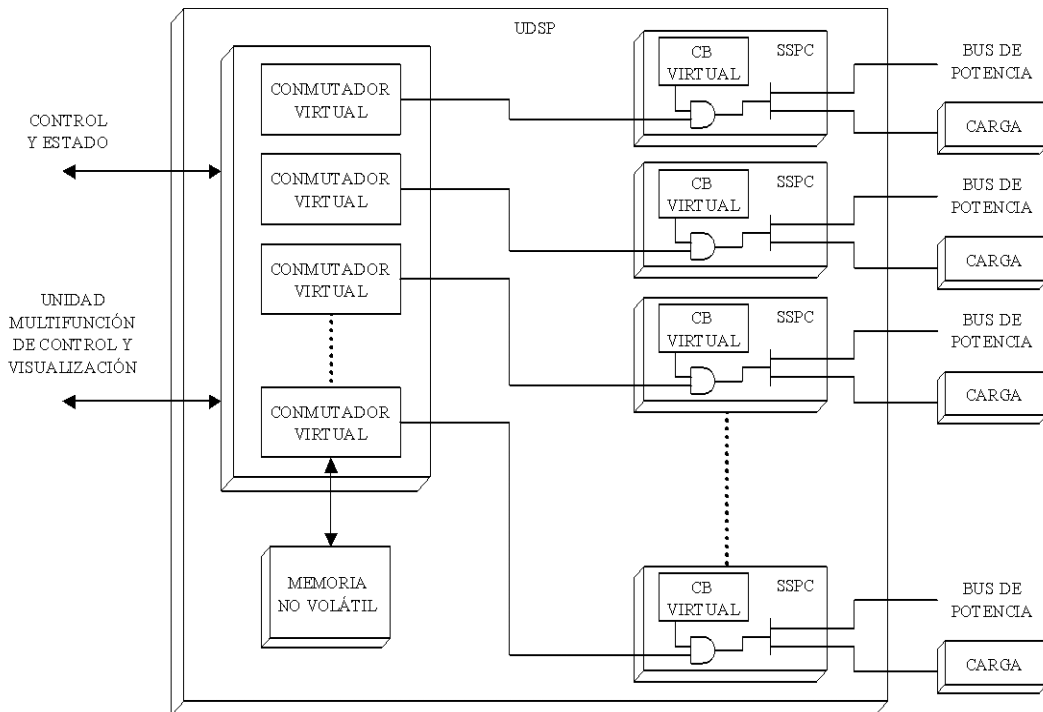
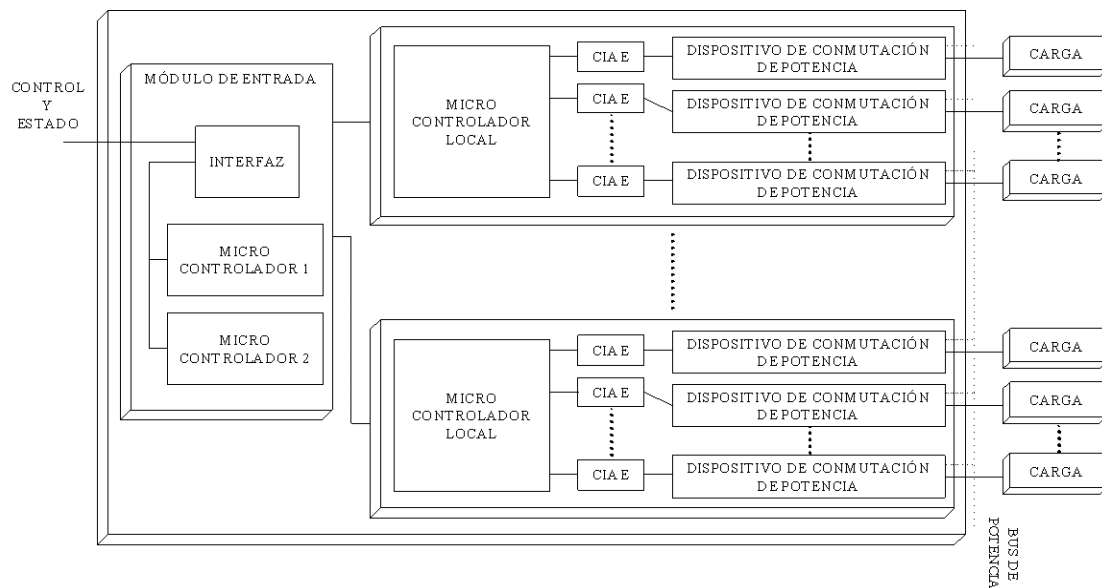


Figura 3.25: UDSP configurable

En [Mares03] se plantea la conveniencia de disponer de un **centro de gestión de cargas eléctricas** (de sus siglas en inglés ELMC, *Electric Load Management Center*) que incluya avanzados controladores integrados de conmutación de potencia que funcionen conjuntamente con los microcontroladores locales posibilitando un control adicional y la configuración individual de cada conmutador, ver Figura 3.26. El diseño propuesto introduce una serie de circuitos integrados de aplicación específica (de sus siglas en inglés ASIC, *Application Specific Integrated Circuit*) para conectar los diferentes dispositivos de conmutación.



**Figura 3.26: Diagrama de bloques de un ELMC**

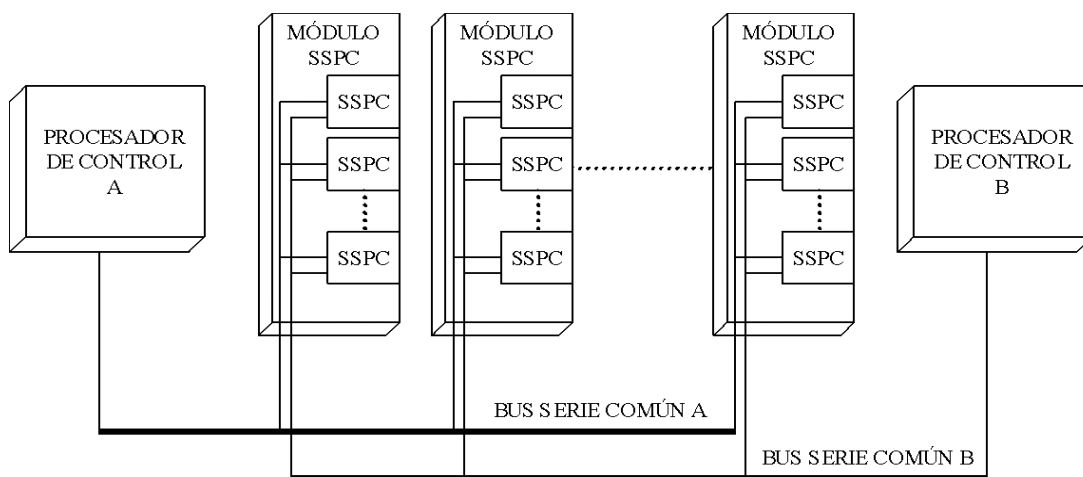
Siguiendo en la línea de aplicación de los SSPC dentro del ámbito de los sistemas de distribución secundaria de potencia eléctrica en los aviones, en [Atkey04] se plantean algunas ideas de configuración para arquitecturas de distribución eléctrica en los aviones, y más concretamente en los aviones más eléctricos, incluyendo **unidades remotas de distribución de potencia** para cuyo desarrollo se considera el empleo de los SSPC.

En [Beneditz05] se presenta una **unidad de distribución de potencia (UDP), de arquitectura redundante**, que incluye varios módulos de potencia, los cuales emplean SSPC para controlar múltiples cargas y proporcionar flexibilidad a las salidas de potencia para las cargas. Mediante el empleo de los SSPC, ya sean programables o de

características fijadas de corte por sobrecarga, se consigue ajustar el diseño para una aplicación determinada. Además, este tipo de diseño reduce el efecto de un fallo simple.

En [Nguyen05] se presenta un control novedoso de cargas trifásicas de frecuencia variable, mediante el uso de tres SSPC, en sustitución de los convencionales dispositivos electromecánicos. Con el uso de esta tecnología, es posible conectar las cargas durante los pasos por cero de las tensiones, de forma que, se logra una considerable reducción de armónicos. Además, con este sistema, se consigue minimizar los efectos de las interferencias electromagnéticas no deseadas, así como, reducir el estrés térmico de los componentes y las cargas durante las conmutaciones. Otra de la funcionalidad que incluye el dispositivo presentado es la incorporación de un controlador, el cual se encarga de monitorizar, por un lado, el calentamiento del sustrato del SSPC y del elemento conmutador de potencia, y por otro lado, las corrientes por el propio conmutador de potencia. Cuando se detecta una temperatura o un nivel de corriente por encima de los umbrales máximos permitidos, se comanda una apertura inmediata de los elementos conmutadores de potencia.

En [Hanson06] se muestra una **arquitectura mejorada de control y comunicación redundante** para una UDSP que incluye varios módulos de potencia con al menos un SSPC controlando una carga eléctrica conectada a la UDSP, ver Figura 3.27.



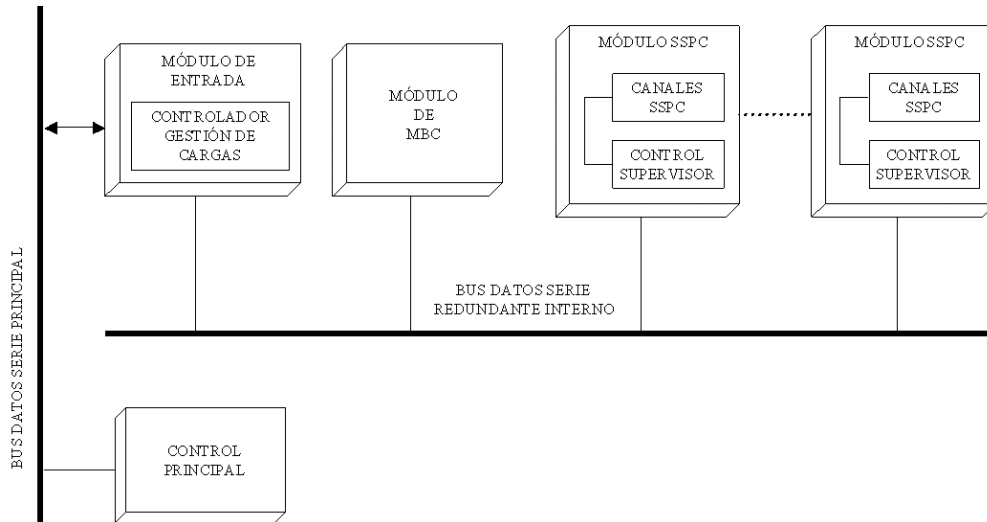
**Figura 3.27: UDSP con conexión directa control-SSPC vía bus serie**

Dos buses de datos tipo serie, conectando directamente cada uno de los módulos de control con los SSPC de los módulos de potencia, permiten la transmisión directa de las comunicaciones y los datos de control. De esta forma se consigue un sistema, con SSPC redundante, reduciendo así los posibles puntos comunes de fallo en las comunicaciones.

Ya se ha referenciado los avances en cuanto al diseño del SSPC a nivel de componente que aporta [Tofigh06] en el epígrafe 3.5.1. No obstante, esta patente muestra además la aplicación directa del dispositivo en la constitución de una unidad de distribución de potencia que comprende varios SSPC y un microcontrolador externo, capaz de intercambiar mensajes con los microcontroladores integrados en los SSPC, para modificar las condiciones de operación, como por ejemplo los umbrales de activación de la protección sobrecorriente.

En [Nguyen07] se presenta un diseño para la generación y distribución de una tensión con suministro de **alimentación redundante a los componentes de un SDPE**, que incluyan SSPC. Un dispositivo de suministro de potencia genera una señal de tensión primaria y una o varias señales de tensión de respaldo, las cuales se distribuyen por todo el sistema eléctrico para proporcionar el suministro redundante. De esta forma se minimiza el efecto adverso en el sistema resultante del fallo de un suministro de tensión simple o un canal SSPC simple. Este aspecto resulta muy beneficioso teniendo en cuenta que, como ya se ha mencionado anteriormente, el desarrollo de los SDPE está haciendo que estos sistemas sean cada vez más dependientes de la tecnología electrónica.

En el diseño del sistema de distribución secundaria de potencia (SDSP) que aparece en [Liu08B], ver Figura 3.28, es un sistema inteligente en el que un **módulo de mantenimiento basado en condiciones de estado**, que recibe datos directamente de los módulos SSPC, puede realizar pronóstico sobre posibles modos de fallo y sus causas, efectos más probables de cada modo de fallo y propuestas de mantenimiento apropiado para cada tipo de fallo, empleando registros históricos de fallo, probabilidad y costes para comparar, económica y técnicamente, las opciones.



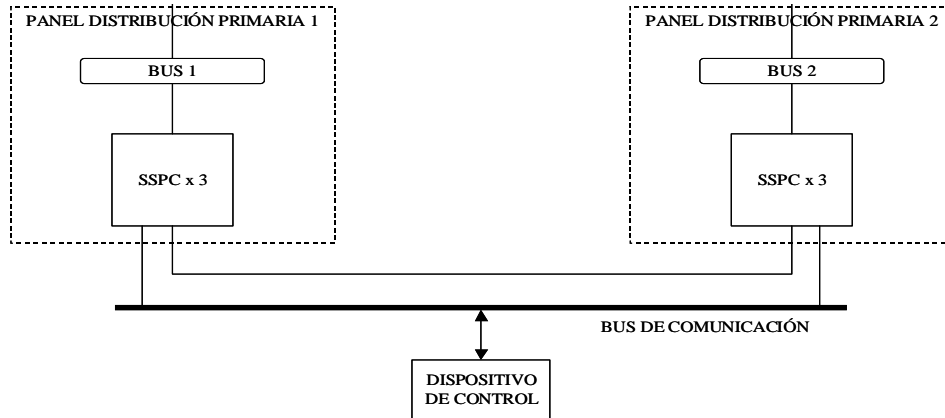
**Figura 3.28: SDSP inteligente con mantenimiento basado en condiciones (MBC)**

Además, el módulo de mantenimiento es capaz de dar recomendaciones al control principal del SDSP sobre como reconfigurar el sistema para una operación más segura y eficiente. Por otro lado, incluye un módulo de entrada al SDSP, el cual está provisto de un controlador de gestión de cargas que se encarga de proporcionar la interfaz entre el bus principal del avión y el módulo mantenimiento anteriormente mencionado, ó los módulos SSPC. Por su parte, los módulos SSPC incluyen un control supervisor responsable de controlar los canales de cada módulo. Para conectar físicamente tanto el módulo MBC (mantenimiento basado en condiciones), como los módulos SSPC, con el módulo de entrada, se dispone de un bus redundante tipo serie, interno e independiente.

En la línea de reducción de conexiones físicas marcada por [Liu08B], en [Yu08B] se muestra un SDSP en el cual se emplea una **red de comunicaciones optimizada**, para monitorizar y controlar de forma centralizada el suministro de potencia eléctrica a las cargas. También, se propone el empleo de una red de comunicación remota para evitar, la presencia del cableado de comunicación. Este hecho resulta altamente ventajoso en aplicaciones aeronáuticas, por la evidente reducción de peso y volumen que supone.

En [Rusan09] se plantea la opción de sustituir los algoritmos de control de los contactores de enlace de buses de distribución, normalmente situados en los dispositivos de control

convencionales, por algoritmos situados en los **SSPC mejorados con protección diferencial y de desequilibrio de corriente**, ver Figura 3.29.



**Figura 3.29: SSPC como interruptor de enlace entre buses**

De esta forma se puede conseguir un sistema, más simple y eficiente, de reconfiguración del flujo de potencia en plataformas con varias fuentes de alimentación, por ejemplo para el caso de interrupción ocasional del suministro de energía por parte de alguna de las fuentes presentes. Como ejemplo, se plantea una configuración con dos fuentes de alimentación y sus respectivos paneles de distribución primaria.

### 3.5.3 Fabricantes

Actualmente, existen numerosos fabricantes de módulos de SSPC, con uno o varios dispositivos electrónicos embebidos en la misma placa. La integración de varios SSPC en la misma tarjeta facilita la integración de estos componentes en los sistemas embarcados. Estos módulos junto a un sistema de gestión inteligente, hacen posible la conexión y desconexión de las cargas remotas, pulsando un botón desde la cabina del piloto. De entre todos los fabricantes se pueden destacar, teniendo en cuenta los dispositivos encontrados hasta la fecha, los siguientes:

- National Hybrid INC. [NHi]
- Esterline Leach International. [P152]
- DDC Data Device Corporation. [DDC] [RP-21415]

- Sensitron Semiconductor. [SPD25D28]
- Ametek. [Ametek]

Está cada vez más extendido el uso de varios SSPC, dentro de un mismo modulo [Ametek] [RP-21415], con la finalidad de controlar varias cargas, localizadas en un área concreta del sistema embarcado. El control de varios SSPC es habitual realizarlo mediante el uso de microprocesadores ó FPGA (*Field-programmable gate array*). Uno de los microprocesadores pueden ser los DSP (*Digital signal processor*), que permiten tener en todo momento un control total de las cargas conectadas al bus, mediante la monitorización de cada uno de los interruptores de estado sólido de potencia que las controla.

Destacar de todos los fabricantes a Leach Internacional [P152], el cual ha desarrollado unidades con hasta 28 SSPC integrados en el mismo equipo, denominado “Unidad Secundaria de Distribución de Potencia”, siendo siglas en ingles SPDU (de sus siglas en ingles, *Secondary Power Distribution Unit*), ver Figura 3.30.



**Figura 3.30: Unidad de distribución de potencia con SSPC fabricada por LEACH**

Estos equipos se encargan de realizar la distribución de potencia a un nivel secundario. Generalmente, se encuentran localizados dentro de los sistemas embarcados, en zonas próximas a donde se encuentran las cargas, lo cual reduce el cableado y permite una mejor monitorización y control de las cargas.



### 3.6 Problemas detectados en los SSPC

Como consecuencia de la reciente aplicación de este componente en comparación con otras protecciones de los SDPE embarcados, es natural la aparición de algunos puntos críticos ó fallos de funcionamiento, en los cuales el dispositivo debe ser mejorado.

#### 3.6.1 Falsas alarmas

En [Stavnes94] se presenta un estudio de la seguridad del cableado y los fallos que se producen en las instalaciones embarcadas. En este estudio realizado por la NASA se señala cómo afectan los umbrales de activación de la protección  $I^2t$  al funcionamiento del dispositivo. Los niveles de actuación, marcados por la curva  $I^2t$ , provocan un corte instantáneo de la corriente ante niveles de corriente por encima del 1000% de la nominal. En algunas ocasiones, estos niveles no son efectivos a la hora de detectar fallos por arco, con el consecuente perjuicio para el cableado. Una de las soluciones adoptadas es la disminución de los umbrales de las curvas de protección ( $I^2t$ ), sin embargo, se ha comprobado como aumenta la probabilidad del número de falsas alarmas.

#### 3.6.2 Inestabilidades del sistema

A raíz de los problemas detectados en el sistema eléctrico de la Estación Espacial de la NASA, en [Panov96] se presenta un modelo de SSPC que pone de manifiesto la influencia de las capacidades parásitas del MOSFET en la estabilidad del sistema, ver Figura 3.31.

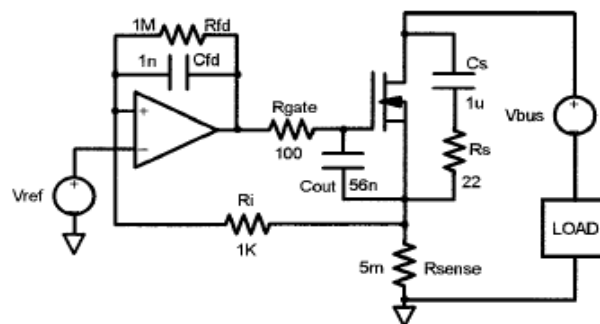


Figura 3.31: Modelo simplificado de SSPC

Estas capacidades pueden llegar a provocar un acoplamiento entre el lazo de control de corriente que controla el SSPC y el convertidor, que actúa de carga situado aguas abajo. Este acoplamiento puede originar inestabilidades del sistema completo. Teniendo en cuenta el carácter universal de los SSPC, que les permite ser utilizados para la conexión y desconexión de multitud de cargas, se muestra como mediante el modelado se pueden predecir fallos de mal funcionamiento.

### **3.6.3 Problemas ante perturbaciones EMI**

En el informe [Mandl01], se describe los efectos del SSPC frente a perturbaciones de tipo EMI. Se han detectado fallos de funcionamiento incorrecto ante eventos de carácter EMI, los cuales han desencadenado, unos cortes instantáneos de corriente por las cargas situadas aguas abajo del SSPC, sin llegar a reportar el cambio de estado del SSPC por la línea de estado. Estos fallos son consecuencia de la gran dependencia interna de la electrónica, que tiene el componente.

### **3.6.4 Problemas en la conexión y desconexión de cargas capacitivas e inductivas**

Teniendo en cuenta la diferente tipología de las cargas de un sistema eléctrico, los SSPC presentan problemas durante la conexión de cargas capacitivas [Izquierdo08]. Esto supone un inconveniente debido principalmente a la potencia disipada durante la conexión de estas cargas, problema que no tenían los convencionales CB u otros dispositivos mecánicos. De este modo, el SSPC disipa grandes cantidades de potencia durante la conmutación de la carga, proporcional a los niveles de tensión y corriente que circulan por la carga [Simon93]. Finalmente, cabe destacar que los esfuerzos en este sentido se han encaminado en los últimos años hacia técnicas de control activo de la corriente, por parte de los SSPC. Se trata de controlar el estado de los elementos semiconductores, dependiendo de la tensión a la que se ven sometidos en cada instante de tiempo, de forma que el punto de operación quede siempre dentro de una zona de seguridad operativa que no debe excederse [Simon93]. Siguiendo esta línea, en [Mussma03] ya descrito, se presenta soluciones técnicas para tratar la conexión de grandes cargas capacitivas, usando un SSPC digital (DSSPC) con limitación de corriente

por “*foldback*”, descrita al comienzo del capítulo. Así pues, la conmutación inteligente limita y controla activamente la corriente máxima suministrada a la carga de forma que, durante el encendido, ésta sea inversamente proporcional a la tensión en el elemento aguas abajo del SSPC.

Un efecto similar se produce durante la desconexión de cargas inductivas. Debido al efecto inductivo, introducido por el cable, se producen sobretensiones en los terminales o bornes del SSPC, aunque este efecto se puede corregir con diodos de libre circulación.

### **3.6.5 Falta de aislamiento galvánico de los SSPC**

Los SSPC, frente a otro tipo de protección convencional, tienen la problemática de que ante un fallo interno del dispositivo, se puede producir la unión eléctrica permanente de sus contactos principales, por ejemplo, como consecuencia de un fallo por una sobre temperatura extrema. Como consecuencia de la falta de aislamiento eléctrico, existen limitaciones a la hora de utilizar esta tecnología en ciertas aplicaciones, que requieren de una separación física entre los contactos del dispositivo cuando se comanda la apertura. Así pues, en un sistema embarcado ante un fallo de cualquier dispositivo de protección, se requiere la apertura inmediata que impida el paso de corriente aguas abajo. Sin embargo, en el SSPC ante un fallo de funcionamiento del dispositivo, provocado por elevados niveles de corriente, se puede producir internamente la unión física de los contactos del componente debido a su carácter electrónico, lo cual implica un modo de fallo no seguro.

De este modo, el SSPC necesita trabajar en combinación con sistemas convencionales de protección, que proporcionen la apertura del circuito ante un fallo del SSPC. Esta problemática la han intentado resolver algunos fabricantes como AMETEK que propone la utilización interna de elementos convencionales, tales como fusibles.

### **3.6.6 Limitaciones en la tecnología del semiconductor principal del SSPC**

Otro de los problemas no resueltos, es la limitación de corriente que este tipo de tecnología presenta. Hasta 25 amperios es adecuado el uso de los SSPC en las arquitecturas de 270 V<sub>CC</sub>. A partir de estos niveles se hace necesario el uso de contactores

electromecánicos, por la limitación práctica de las tecnologías FET, aunque actualmente ya se está investigando en otras tecnologías, que permiten un mayor nivel de corriente, como la IGBT. Pero la tecnología IGBT tiene también una limitación debido a las características de que son semiconductores basados en silicio y por lo tanto la máxima temperatura de funcionamiento está limitada a 125°C. Por lo tanto, se impone el encontrar mejoras de los SSPC, para poder realizar un sistema fiable de distribución totalmente basado en tecnología de Estado Sólido [Weimer02]. Ante esta limitación del dispositivo es necesario recurrir a los convencionales elementos electromecánicos. Recientemente, se está empezando a trabajar en el campo de aplicación de los semiconductores basados en carburo de silicio (SiC), que ofrece bajas resistencias de conducción con altas tensiones de funcionamiento y soporta temperaturas de hasta 200°C. Se han presentado SSPC basados en tecnología de SiC que pueden manejar hasta 30A con tensiones de 270V<sub>CC</sub> [Xiaohu08].

### **3.7 Conclusiones**

En este capítulo se hace un análisis del estado de la técnica de los dispositivos actuales de protección, utilizados en los sistemas de distribución de potencia eléctrica embarcados, como son fusibles, circuitos magnetotérmicos (CB), circuitos magnetotérmicos con control remoto (RCCB), circuitos magnetotérmicos con protección frente al arco (AFCB) y los controladores de potencia de estado sólido (SSPC). Por otro lado, se han analizado y expuesto las ventajas y desventajas de los distintos dispositivos de protección utilizados, hasta la fecha, en los sistemas eléctricos embarcados, comparando las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

Dentro de los componentes de protección se ha matizado la importancia de los SSPC como dispositivo esencial en las nuevas arquitecturas de distribución, ya descritas en el capítulo 2. Como punto de partida de este trabajo de investigación, se ha recogido los antecedentes del SSPC, se ha descrito la arquitectura interna del SSPC, y se han mostrado las principales aplicaciones y líneas de investigación de estos nuevos dispositivos de protección en los sistemas embarcados.

Finalmente, se han indicado los principales problemas que presenta el SSPC dentro de los nuevos sistemas de distribución de potencia eléctrica, así como, las limitaciones del componente.

Una de las principales limitaciones se presenta a la hora de conectar grandes cargas capacitivas, en los sistemas eléctricos embarcados, mediante el uso de este tipo de dispositivos, como pueden ser lámparas, motores, etc.

De todos los problemas y limitaciones encontrados, esta tesis doctoral se centrará en el análisis de la conexión de cargas altamente capacitivas, el modelado del SSPC y el diseño y la implementación de un prototipo de SSPC, configurable con tecnología MOSFET o IGBT.

### 3.8 Referencias

- [AMC05] AMC-Plane Talk. Aeronautical Radio INC. Maryland (United States). Industry Highlights. “Electrical Protection Devices”. Volume XVI, N.º 2. February 2005.
- [Ametek] “10676 Series DC Solid State Power Controller”. Power Distribution; Ametek Aerospace & Defence. Web available: <http://www.ametekaerospace.com>
- [AS33201] AS33201, “Circuit Breaker-Aircraft, Trip-Free, Push Pull, 1/2 THRU 20 Amps, Type 1 -55 THRU +121 °C”. SAE The engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space International. Rev. 31-AUG-99. Web available: <http://www.sae.org>
- [AS5692] AS5692, Arc Fault Circuit Breaker (AFCB), Aircraft, Trip-Free Single Phase 115 Vac, 400 Hz - Constant Frequency. SAE The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space International.
- [Atkey04] Atkey, W. A. et al, “Electric-Based Secondary Power System Architectures for Aircraft”. WO 2004/037641 A2. International Application published under the patent cooperation treaty (PCT). 6 May 2004.
- [Ausman08] Ausman, M. et al., “Backup Electrical Power System for Solid-State Aircraft Power Distribution Systems”. V. Gerald Grafe, esq; US 2008/0036298 A1. United States Patent Application Publication. February 14, 2008.
- [Avionics05] Avionics Magazine. Access Intelligence. Potomac (United States). Tech Report; “Secure Power with Next-Generation PDSUs”. Volume 29, N.º 6. ISSN-1085-9284. June 2005. Web available: <http://www.avionicsmagazine.com>
- [Barrado08] Barrado, A.; Izquierdo, D.; Raga, C.; Lázaro, A. and Sanz, C. M., “SSPC Model with Variable Reset Time, Environmental Temperature Compensation and Thermal Memory Effect”. Applied Power Electronics Conference and Exposition 2008. APEC '08. 23rd Annual, 24-28 February 2008: 1716-1721.

- [Beneditz05] Beneditz, B. D. et al., “Power Distribution Assembly with Redundant Architecture”. Hamilton Sundstrand Corporation. Patent Number: US 6,856,045 B1. February 15, 2005.
- [Beneditz06] Beneditz, B. D. et al., “Power Interruption System for Electronic Circuit Breaker”; US2006/0044723 A1. United States Patent Application Publication. 2 March 2006.
- [Cronin78] Cronin, M. J., “Electric Power Control System with Load Management Programming”. Lockheed Aircraft Corporation. Patent Number: 4,106,013. United States Patent. August 8, 1978.
- [Darty98] Darty, M. A., “Modular Solid State Power Controller with Microcontroller”. McDonnell Douglas Corporation, Patent Number: 5752047. United States Patent. May 12, 1998.
- [DDC] “Remote Solid-State Power Controllers. Standard Product & Custom Solutions For Your Power Control Needs”. DDC Data Device Corporation. Web available: <http://www.ddc-web.com>
- [Drake02] Drake, P. R. et al., “Configurable Aircraft Power System”. Hamilton Sundstrand Corporation. Patent Number: US 6,470,224 B1. United States Patent. October 22, 2002.
- [EATON] Remote Controlled Circuit Breaker (RCCB) EATON. Web available: <http://www.aerospace.eaton.com/>
- [E-T-A] E-T-A. Remote Control Circuit Breaker (RCCB) 4930-01-5. Web available: <http://www.e-t-a.com/>
- [Friedman92] Friedman, S. N., “Solid-state Power Controller for the Next Generation”. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE Volume 7, Issue 9. September 1992: 24-29.
- [Friedman99] Friedman, S. N., “Robust/low cost solid-state remote power controller (RPC) technology is here”, Digital Avionics Systems Conference, 1999. Proceedings. 18th, Volume: 1/17 pp. vol.1, 24-29 Oct. 1999 Pages: 3.B.4-1 - 3.B.4-7.
- [Furse04] Furse, C., “Finding Fault: Locating Hidden Hazards on Aircraft Wiring”. College of Engineering University of Utah. February 2004.

- [Hanson06] Hanson, M. et al., “Individually And Redundantly Addressable Solid-State Power Controllers on Multiple Modules in a Power Distribution Assembly”. Hamilton Sundstrand Corporation; US 2006/0071559 A1. United States Patent Application Publication. April 6, 2006.
- [Hart97] Hart, D. S.; Prickett, G. B.; Schwarz, C. R. and Mohadjer, M., “A Solid State Power Controller Module for the International Space Station EXPRESS Rack”, Energy Conversion Engineering Conference, 1997. IECEC-97. Proceedings of the 32<sup>nd</sup> intersociety Volume 1. July 27-August 1, 1997: 280-285.
- [Henderson06] Henderson, E. A., “Power Control Interrupt Management”. Rorckford IL; US 2006/0044721 A1. United States Patent Application Publication. March 2, 2006.
- [Izquierdo08] D. Izquierdo, A. Barrado, C. Raga, M. Sanz, P. Zumel, A. Lázaro. “Protection devices for aircraft electrical power distribution systems: a Survey” Industrial Electronics Society, 2008. IECON 2008. 35th Annual Conference of IEEE. Orlando November 11-13, 2008.
- [Izquierdo09] General Systems –Electrical Distribution System. Daniel Izquierdo and Francisco Andreu; Master of Aircraft Systems Integration 1st edition 2009-2010. EADS & Universidad Carlos III de Madrid.
- [Komatsu07] Komatsu, M.; Ide, N. and Yanabu, S., “A Solid-State Current Limiting Switch for Application of Large-scale Space Power Systems”. Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. IEEE 17-21 June 2007:1471-1476.
- [KwaSur94] Kwa-Sur T.; Lifeng Y. and Dravid, N., “Modeling the Protection System Components of the Space Station Electric Power System”. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on Volume 30, Issue 3, July 1994: 800-808.
- [Label95] Label, K. A.; Barry, R. K.; Castell, K.; Kim, H. S. and Seidleck, C. M., “Implications of Single Event Effect Characterization of Hybrid DC-DC Converters and Solid State Power Controller”. Nuclear Science, IEEE Transactions on Volume 42, Issue 6, Part 1. December 1995: 1957-1963.
- [Lazarovich04] Lazarovich, D. et al., “Arc Fault Detection for SSPC Based on Electrical Power Distribution Systems”. Honeywell International Inc; WO



- 2004/073131 A1. International Application published under the patent cooperation treaty (PCT). August 26, 2004.
- [Liu05] Liu, W.; Huang, A.Q.. “A Novel High Current Solid State Power Controller”. Dept. of Electr. & Comput. Eng., North Carolina State Univ., Raleigh, NC, USA; Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 32nd Annual Conference of IEEE. Publication Date: November 6-10, 2005.
- [Liu08A] Liu, Z. et al., “The SSPC technology incorporated with thermal memory effects to achieve the fuse curve coordination”. Honeywell International Inc. European Patent Application. EP 1 947 751 A2. 23 July 2008.
- [Liu08B] Liu, Z. et al., “Intelligent Aircraft Secondary Power Distribution System That Facilitates Condition Based Maintenance”. Honeywell International Inc; US 2008/0217471 A1. United States Patent Application Publication. September 11, 2008.
- [Mandl01] Mandl Dan et al, “EO-1 Anomaly Resolution Report for ACE Anomaly of 9-14-01”. NASA’s Goddard Space Flight Center , 2001. Web available: <http://eo1.gsfc.nasa.gov/new/validationReport/Technology/>
- [Mares03] Mares, M.; Liu, Z., “Electric Load Management Center”. Honeywell International Inc.; WO 2003/098403 A3. International Application published under the patent cooperation treaty (PCT). 27 November 2003.
- [Maxwell02] Maxwell, J. M.; Blumer, J. H. and Burden, B., “A Configurable Solid State Power Management and Distribution System”. Power Systems Conference. Society of Automotive Engineers, Inc.; October 2002.
- [McCollu88] McCollum, P., “Universal Solid State Power Controller”. Rockwell International Corporation; WO 88/01077. International Application published under the patent cooperation treaty (PCT). 11 February 1988.
- [MSTD1553] “MILSTD1553B, Aircraft Internal Time Division Command/ Response Multiplex Data Bus”. Military Standard.
- [Mussma03] Mussmacher, K. A.; P.E. and Froeb, W. L. “SSPC Handle Heavy Loads With Fold-back Current Limiting”. National Hybrid Inc., Ronkonkoma, N.Y. Power Electronics Technology. January 2003.

- [Mussma04] Mussmacher K. A.; P.E. and Froeb, W. L. “Controllers Guard Against Arc Faults”. National Hybrid Inc., Ronkonkoma, N.Y. Power Electronics Technology. November 2004.
- [Nguyen05] Nguyen, T., “System and Method Utilizing a Solid State Power Controller (SSPC) for Controlling an Electrical Load of a Variable Frequency Three-phase Power Source”. Honeywell International Inc; US 2005/0052808 A1. United States Patent Application Publication. March 10, 2005.
- [Nguyen07] Nguyen, T., “Generation and Distribution of a Dual-Redundant Logic Supply Voltage for an Electrical System”. Honeywell International Inc; US 7,205,681 B2. United States Patent. 17 April 2007.
- [NHi] “Solid-State Power Controllers (SSPCs). Series 91000—28 & 270-VDC, @10 & 20 AMPS”. National Hybrid Inc., Ronkonkoma, N.Y.
- [P152] P152 Series. “Solid State Power Controller 270 VDC, 1PNO-With Current Status Output up to 7.5 AMP Rating”. Engineering Data Sheet. Esterline Leach International. Web available: <http://www.leachintl.com>
- [Pace08] Pace, B. G., “Digital Integration Method”. Nacional Hybrid Inc. Patent Number: US 7,421,353 B1. United States Patent. September 2, 2008.
- [Panov96] Panov, Y. V. and Lee, F. C., “Modeling and Stability Analysis of a DC Powersystem with Solid State Power Controllers”, Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1996. APEC '96. Conference Proceedings 1996, Eleventh Annual, Volume: 2, March 3-7, 1996: 685-691.
- [Parkinson95] Parkinson, G. W., “Power Controller Reset During Load Starting”. United Technologies Corporation. Patent Number: 5,455,731. United States Patent. October 3, 1995.
- [Plivcic07] Plivcic, B. et al, “Backup Control for Solid State Power Controller (SSPC)”. Honeywell International Inc. European Patent Application. EP 1 840 688 A2. 3 October 2007.
- [Potter03] Potter, T. E., “Arc Fault Interruption Requirements for Aircraft Applications”. Texas Instruments. November 2003.

- [Potter06] Potter, F. J. and Furmanski, D., "Retrofitting Solid State Power Distribution into Existing Aircraft". 9th Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference 2006.
- [Roy87] Roy Y. Kinoshita, "Solid State DC Power Switch". Rockwell International Corporation. Patent Number: 4709160. United States Patent. November 24, 1987.
- [RP-21415] RP-21415D2-600. "Remote Solid-State Power Controllers". DDC Data Device Corporation, 2006. Web available: <http://www.ddc-web.com>
- [RS232] EIA Recommended Standard number 232. Interface between Data Terminal Equipment and Data Communications Equipment Employing Serial Binary Data Interchange.
- [Rusan09] Rusan, I. et al., "Solid State Power Controller (SSPC) Used as Bus Tie Breaker in Electrical Power Distribution Systems". Honeywell International, Inc; US 2009/0189455 A1. United States Patent Application Publication. July 30, 2009.
- [Simon93] Simon J. J., "State of the Art in Solid State Power Controller for Aeronautical Application". The European Power Electronics Association. September 1993: 121-126.
- [SPD25D28] SPD25D28. "DC Solid State Power Controller Module". Technical Data Datasheet 4310, Rev-. Sensitron Semiconductor. Web available: <http://www.sensitron.com>
- [Spyker05] Spyker, R.; Schweickart, D. L. and Horwath, J. C., "An Evaluation of Diagnostic Techniques Relevant to Arcing Fault Current Interrupters for Direct Current Power Systems in Future Aircraft". Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2005. Proceedings. October 2005: 146-150.
- [Stavnes94] Stavnes, M. W. and Hammoud, A. N., "Assessment of Safety in Space Power Wiring Systems". Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE. Volume 9, Issue 1, January 1994: 21-27.
- [Theisen86] Theisen, P.; Krstic, S. and Chen, C., "270-V Dc Hybrid Switch". Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on [see also IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, B, C]. Volume 9, Issue 1, March 1986: 97-100.

- [Tofigh06] Tofigh, F. et al., "Power Distribution System Using Solid State Power Controllers". Christie, Parker & Hale, LLP; US 2006/0200688 A1. United States Patent Application Publication. September 7, 2006.
- [Weimer02] J. Weimer; " Power Electronics in the More Electric Aircraft" 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 14-17 January 2002 / Reno, Nevada.AIAA 2002-0727.
- [Xiaohu08] SiC based Solid State Power Controller. Xiaohu Feng; Radun, A.V. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2008. APEC 2008. Twenty-Third Annual IEEE 24-28 Feb. 2008 Páginas: 1855 - 1860.
- [Yu08A] Yu, W., "Differential Arc Fault Detection". Honeywell International Inc; US 2008/0129307 A1. United States Patent Application Publication. June 5, 2008.
- [Yu08B] Yu, W.; Liu, Z., "Network-Based Aircraft Secondary Electric Power Distribution System". Honeywell International Inc; US 2008/0303353 A1. United States Patent Application Publication. December 11, 2008.

# Capítulo 4

## **4. ESTRATEGIAS DE CONEXIÓN DE CARGAS ALTAMENTE CAPACITIVAS MEDIANTE SSPC**



ÍNDICE CAPÍTULO 4

---

4.1	INTRODUCCIÓN .....	123
4.2	CONEXIÓN DE CARGAS MEDIANTE CONTROL PASIVO DE LA CORRIENTE.....	125
4.2.1	<i>Calculo de los principales parámetros de funcionamiento del SSPC, durante el transitorio, con control pasivo.....</i>	<i>127</i>
4.2.2	<i>Valor máximo de la capacidad del condensador, que se puede conectar mediante el control pasivo.....</i>	<i>135</i>
4.2.3	<i>Ventajas e inconvenientes del control pasivo de la corriente .....</i>	<i>136</i>
4.3	CONEXIÓN DE CARGAS MEDIANTE CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE .....	138
4.3.1	<i>Calculo de los principales parámetros de funcionamiento del SSPC durante el transitorio de conexión con control activo con corriente constante.....</i>	<i>138</i>
4.3.2	<i>Valor máximo de la capacidad del condensador, que se puede conectar con control activo con corriente constante.....</i>	<i>142</i>
4.3.3	<i>Simulación de la conexión mediante control activo con corriente constante.....</i>	<i>143</i>
4.3.4	<i>Ventajas e inconvenientes del control activo con corriente constante.....</i>	<i>145</i>
4.4	CONEXIÓN MEDIANTE CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE .....	147
4.4.1	<i>Calculo de los principales parámetros de funcionamiento del SSPC durante el transitorio de conexión a derivada de corriente constante .....</i>	<i>147</i>
4.4.2	<i>Valor máximo de la capacidad del condensador, que se puede conectar con control activo con derivada constante de la corriente.....</i>	<i>152</i>
4.4.2.1	<i>Cálculo del condensador máximo: método exacto .....</i>	<i>152</i>
4.4.2.2	<i>Calculo del condensador máximo: mediante el polinomio de Taylor orden 3° .....</i>	<i>152</i>
4.4.2.3	<i>Calculo del condensador máximo: mediante el polinomio de Taylor orden 4° .....</i>	<i>153</i>
4.4.2.4	<i>Método simplificado por aproximación gráfica .....</i>	<i>154</i>
4.4.3	<i>Simulación de la conexión con control activo con derivada constante de la corriente .....</i>	<i>157</i>
4.4.4	<i>Ventajas e inconvenientes del control activo con derivada constante de la corriente .....</i>	<i>159</i>

4.5	CONEXIÓN DE CARGAS MEDIANTE CONTROL ACTIVO GENERALIZADO .....	161
4.5.1	<i>Calculo de los principales parámetros de funcionamiento del SSPC durante el transitorio de conexión con control activo generalizado .....</i>	<i>162</i>
4.5.2	<i>Valor máximo de la capacidad del condensador, que se puede conectar mediante control activo generalizado.....</i>	<i>166</i>
4.5.2.1	Calculo del condensador método exacto .....	166
4.5.2.2	Método simplificado por descomposición.....	167
4.5.3	<i>Simulación de la conexión con control activo generalizado .....</i>	<i>167</i>
4.5.4	<i>Ventajas e inconvenientes del control activo generalizado.....</i>	<i>172</i>
4.6	CONEXIÓN DE CARGAS CON CONTROL ACTIVO ÓPTIMO DE LA TRAYECTORIA DE LA CORRIENTE ..	174
4.6.1	<i>Funcionamiento del SSPC con control activo de la trayectoria óptima de la corriente .....</i>	<i>176</i>
4.6.2	<i>Valor máximo de la capacidad del condensador, que se puede conectar con control activo por trayectoria óptima de la corriente.....</i>	<i>178</i>
4.6.3	<i>Simulación de la conexión con control activo optimo de la trayectoria de la corriente ...</i>	<i>183</i>
4.6.4	<i>Ventajas e inconvenientes del control activo óptimo de la trayectoria de la corriente.....</i>	<i>185</i>
4.7	COMPARATIVA DE LOS MÉTODOS DE CONTROL ACTIVO .....	186
4.8	CONCLUSIONES .....	189
4.9	REFERENCIAS .....	190



## **4.1 Introducción**

Como se ha descrito en el capítulo tercero, el SSPC se puede enfrentar a la conexión de cargas que presenten diferentes tipos de problemáticas, debido a sus múltiples usos en los sistemas embarcados. Una de ellas son las cargas altamente capacitivas, presentes en, prácticamente, todos los sistemas embarcados de avión. Para afrontar la conexión de estas cargas se han desarrollado diferentes técnicas ó estrategias, que permiten el control de la corriente por el semiconductor incluido dentro del SSPC, algunas de ellas ya presentadas en el capítulo 3 [Mussma03].

El objetivo de este cuarto capítulo es revisar y proponer estrategias de control avanzado que permitan realizar la conexión de cargas altamente capacitivas controlando y/o limitando la corriente por el SSPC. Además, se mostrarán los correspondientes cálculos teóricos que describen el funcionamiento del SSPC, de acuerdo a la carga que se vaya a conectar. Por otro lado, se analizarán cuales son las limitaciones de cada solución, destacando las ventajas e inconvenientes de las diferentes propuestas.

En los siguientes párrafos se presentan las cinco estrategias de control para la conexión de cargas altamente capacitivas, que se desarrollaran en este capítulo:

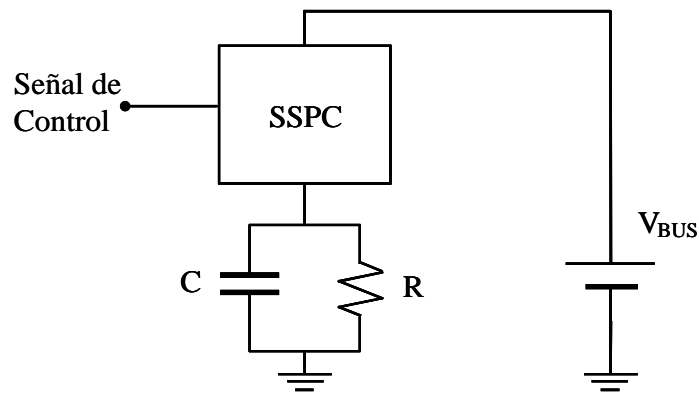
- Control de la corriente por el semiconductor mediante circuitos pasivos, los cuales están constituidos por resistencias, condensadores y diodos. Estos circuitos intervienen en la evolución de la tensión de control del semiconductor y como consecuencia en la corriente del SSPC.
- Control de la corriente por el semiconductor mediante circuitos activos, que permitan mantener la corriente constante por el SSPC durante el periodo de conexión.
- Control de la corriente por el semiconductor mediante un circuito activo que permiten mantener la derivada de la corriente por el SSPC constante.
- Control activo generalizado mediante la combinación de los dos procedimientos anteriormente enumerados.

- Control activo de la trayectoria óptima de la corriente. Esta estrategia permite obtener un aprovechamiento máximo del semiconductor y minimizar el número de semiconductores dentro del SSPC. El procedimiento de conexión está basado en la combinación de los procedimientos anteriormente presentados.

Para cada uno de los métodos planteados se han descrito las ecuaciones que reproducen las formas de onda de las distintas señales del SSPC, y se han definido las expresiones matemáticas que permiten calcular el condensador máximo que se puede conectar, con cada estrategia de conexión propuesta. De este modo, se facilita el diseño del SSPC, y además permite evaluar si es posible conectar mediante el dispositivo una determinada carga altamente capacitiva.

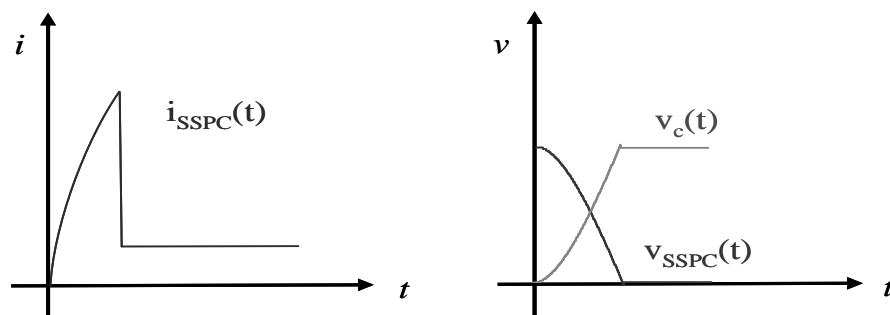
## 4.2 Conexión de cargas mediante control pasivo de la corriente

En un sistema de distribución de potencia eléctrica constituido por SSPC, ver Figura 4.1, durante la conexión de una carga con carácter muy capacitivo, se producen sobrecorrientes que están directamente relacionadas con la tensión del bus y el valor del condensador de la carga que se conecta al bus, ver Figura 4.2.



**Figura 4.1: Circuito de conexión de carga mediante SSPC**

Esta sobrecorriente está provocada por la demanda inicial de energía por parte del condensador, ya que el condensador se encuentra inicialmente descargado. Por otro lado, estas sobrecorrientes circulan por el semiconductor incluido dentro del SSPC, el cual está encargado de controlar la conexión.

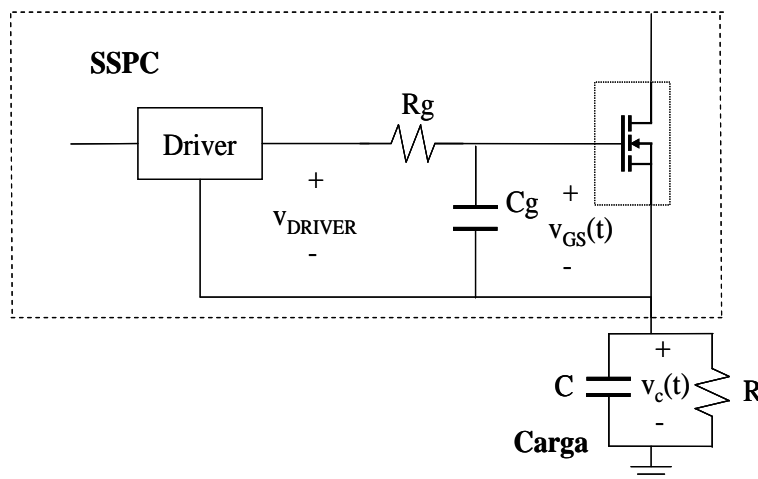


**Figura 4.2: Tensión y corriente en el SSPC durante la conexión de una carga capacitiva sin control de la corriente**

Así pues, si no se controla la corriente por el SSPC durante la conexión de una carga altamente capacitiva, se produce una sobrecorriente elevada con la que se carga el condensador conectado al SSPC, a la tensión fijada por el bus principal, ver Figura 4.2.

Este tipo de conexiones presenta por un lado la problemática de que puede llegar a dañar irreversiblemente al semiconductor y como consecuencia al SSPC, y en segundo lugar como consecuencia de las sobrecorrientes se introducen perturbaciones que pueden afectar al resto de los componentes cercanos, ó incluso afectar a la propia fuente generadora. Para solucionar este problema se pueden optar por diferentes alternativas. En este apartado se describe una de las propuestas, la cual consiste en soluciones pasivas que limitan la pendiente de la corriente de forma no regulada. De este modo, se puede conectar una carga altamente capacitiva únicamente mediante el uso de circuitos pasivos para el control de la tensión de la puerta del semiconductor principal del SSPC.

Uno de los sistemas que permite el control de la corriente de una forma pasiva, se realizar colocando un condensador  $C_g$  entre puerta y surtidor del MOSFET, ver Figura 4.3, en paralelo con el condensador interno del semiconductor  $C_{in}$ . Donde el condensador  $C_g$  tiene un valor muy superior a la capacidad interna  $C_{in}$ , por ello se desprecia el valor de  $C_{in}$  en los cálculos realizados



**Figura 4.3: Circuito propuesto para el control pasivo del encendido del semiconductor**

Así pues, es posible cargar el condensador  $C$  mediante un único pulso de corriente, limitando la tensión entre puerta y surtidor,  $v_{GS}(t)$ , mediante el circuito formado por la resistencia  $R_g$  y el condensador  $C_g$  situados en la puerta del semiconductor. Esta tensión de puerta controla la evolución de la corriente por el semiconductor y puede limitar el valor máximo de la corriente. De este modo, la red  $R_g C_g$  fija la evolución de la tensión de puerta del semiconductor y por lo tanto de la corriente por el SSPC.

Otra estrategia de conexión, consiste en realizar repetidas conexiones y desconexiones de la carga mediante un SSPC durante un tiempo determinado. Este procedimiento es bastante desaconsejable por los efectos de interferencias electromagnéticas, introducidas en el propio circuito y en la carga, los cuales pueden estar fuera de norma [RD160], por lo que no es recomendable para su uso en sistemas de distribución de potencia eléctrica. Esta es la razón por lo que no es utilizado por ningún fabricante de SSPC en la actualidad.

#### 4.2.1 Cálculo de los principales parámetros de funcionamiento del SSPC, durante el transitorio, con control pasivo

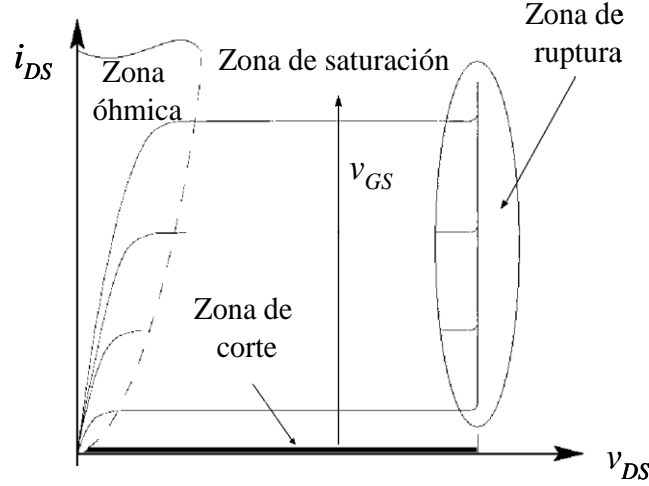
Teniendo en cuenta el circuito de control mediante elementos pasivos, propuesto en el apartado anterior, la tensión entre la puerta y el surtidor del MOSFET evoluciona de acuerdo con la carga del condensador,  $C_g$ . De este modo, el condensador se carga lentamente con la tensión aplicada por el *driver*, encargado del control del semiconductor, de acuerdo a la constante de tiempo introducida por  $R_g$  y  $C_g$ .

Durante la conexión del SSPC con control pasivo de la tensión de puerta, la ecuación lineal que define la corriente por el SSPC, está condicionada por la ecuación de la corriente que circula entre el drenador y el surtidor [Sedra04]:

$$i_{SSPC}(t) = k_M \cdot v_{GS}(t) - V_T \quad (4.1)$$

Donde la constante  $k_M$  depende del semiconductor utilizado, la  $V_T$  es la tensión umbral a partir de la cual entra en conducción el semiconductor y  $v_{GS}(t)$  la tensión entre puerta y surtidor.

Esta ecuación se corresponde con el funcionamiento de un MOSFET en zona de saturación, que es la zona en la cual el transistor se encuentra durante la mayor parte del tiempo durante el periodo de conexión de una carga, ver Figura 4.4.



**Figura 4.4: Zonas de funcionamiento de un MOSFET, con canal N**

La ecuación que define el comportamiento del MOSFET en zona óhmica es cuadrática, Figura 4.4, y no será considerada ya que representa el funcionamiento del SSPC una vez finalizado el proceso de conexión.

Por otro lado, la tensión entre la puerta y el surtidor del MOSFET está condicionada por la evolución de la carga del condensador de puerta, y viene definido por la carga de un condensador a través de una resistencia cuando se le aplica una tensión constante:

$$v_{GS}(t) = V_{DRIVER} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{R_g \cdot C_g}} \right) \quad (4.2)$$

Donde la  $R_g$  y  $C_g$  son las resistencias y condensadores de puerta del semiconductor. Sustituyendo la ecuación (4.2) en la ecuación de la corriente del SSPC en la zona de saturación se obtiene la expresión de la corriente por el SSPC con control pasivo:

$$i_{SSPC}(t) = k_M \cdot \left[ V_{DRIVER} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{R_g \cdot C_g}} \right) - V_T \right] \quad (4.3)$$

Teniendo en cuenta la corriente por el SSPC, se puede calcular la corriente por el condensador a partir de la ecuación diferencial:

$$i_{SSPC}(t) = i_c(t) + \frac{v_c(t)}{R} = i_c(t) + \frac{1}{R \cdot C} \cdot \int i_c(t) \cdot dt \quad (4.4)$$

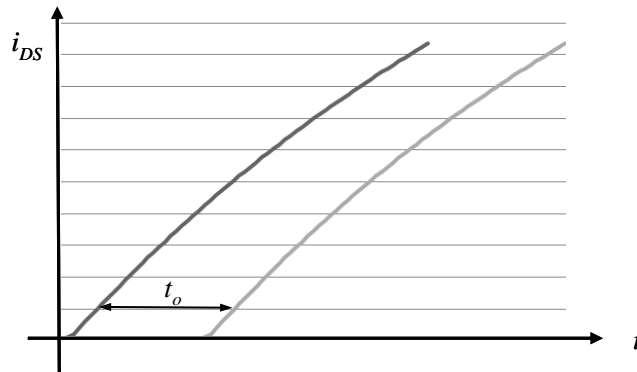
Igualando las ecuaciones (4.3) y (4.4) durante el transitorio, se obtiene la expresión:

$$k_M \cdot \left[ V_{DRIVER} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}} \right) - V_T \right] = i_c(t) + \frac{1}{R \cdot C} \cdot \int i_c(t) \cdot dt \quad (4.5)$$

Si se deriva la expresión (4.5) se obtiene la ecuación diferencial:

$$\frac{k_M \cdot V_{DRIVER}}{Rg \cdot Cg} \cdot e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}} = \frac{di_c(t)}{dt} + \frac{i_c(t)}{R \cdot C} \quad (4.6)$$

Para simplificar las expresiones que se obtengan a partir de este punto se va a proceder al desplazamiento del origen de coordenadas del tiempo, siendo el nuevo origen de coordenadas del tiempo el instante a partir del cual el MOSFET empieza a conducir, ver Figura 4.5. Esto se va a tener en cuenta para los cálculos que se realizarán de la corriente y tensión del SSPC y la carga. El cambio de ejes está provocado por el retardo que el MOSFET presenta antes de entrar en conducción, debido a que la tensión entre puerta y surtidor tiene que alcanzar la  $V_T$  para que empiece a conducir, por lo cual la corriente por el SSPC inicialmente tiene un valor cero hasta que la  $v_{GS}(t)$  alcanza la  $V_T$ .



**Figura 4.5: Desplazamiento del eje de tiempos**

El valor del tiempo de retardo,  $t_o$ , entre que se aplica una tensión  $V_{DRIVER}$  y en el instante en el que el MOSFET empieza a conducir, se puede calcular a partir de la ecuación (4.3), y está definido por expresión:

$$t_o = -Rg \cdot Cg \cdot \ln \left( 1 - \frac{V_T}{V_{DRIVER}} \right) \quad (4.7)$$

Con la nueva localización del origen en el eje de tiempo, la solución a la ecuación diferencial (4.5) no homogénea queda definida de la siguiente forma:

$$i_c(t) = \frac{k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot R \cdot C}{Rg \cdot Cg - R \cdot C} \cdot e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}} + CTE1 \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \quad (4.8)$$

Para calcular las condiciones de contorno hay que tener en cuenta que inicialmente, la corriente por el condensador y la resistencia de la carga es cero:

$$i_c(t=0) = 0 \quad (4.9)$$

Aplicando la condición de contorno en la ecuación (4.8) se obtiene la ecuación particular que resuelve la ecuación diferencial (4.6), la cual define la evolución de la corriente por el condensador de la carga:

$$i_c(t) = \frac{k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot R \cdot C}{Rg \cdot Cg - R \cdot C} \cdot \left( e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}} - e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \right) \quad (4.10)$$

A partir de la expresión que representa el valor de la corriente por el condensador, la tensión del condensador viene definida como:

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \cdot \int i_c(t) \cdot dt = \frac{1}{C} \cdot \int \left[ \frac{k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot R \cdot C}{Rg \cdot Cg - R \cdot C} \cdot \left( e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}} - e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \right) \right] \cdot dt \quad (4.11)$$

De la resolución de la integral indefinida se obtiene:

$$v_c(t) = \frac{k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot R}{Rg \cdot Cg - R \cdot C} \left( -Rg \cdot Cg \cdot e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}} + R \cdot C \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \right) + CTE2 \quad (4.12)$$



Para calcular la constante (CTE2), se sustituye las condiciones iniciales de tensión en el condensador:

$$v_c(t=0)=0 \Rightarrow CTE2 = \frac{k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot R}{Rg \cdot Cg - R \cdot C} Rg \cdot Cg - R \cdot C \quad (4.13)$$

Teniendo en cuenta las condiciones iniciales de la carga y sustituyendo la expresión de CTE2, se obtiene la ecuación de la tensión en el condensador.

$$v_c(t) = \frac{k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot R}{Rg \cdot Cg - R \cdot C} \left( Rg \cdot Cg \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}} \right) + R \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1 \right) \right) \quad (4.14)$$

Donde la corriente por la resistencia está definida por la expresión:

$$i_R(t) = \frac{v_c(t)}{R} = \frac{k_M \cdot V_{DRIVER}}{Rg \cdot Cg - R \cdot C} \left( Rg \cdot Cg \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}} \right) + R \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1 \right) \right) \quad (4.15)$$

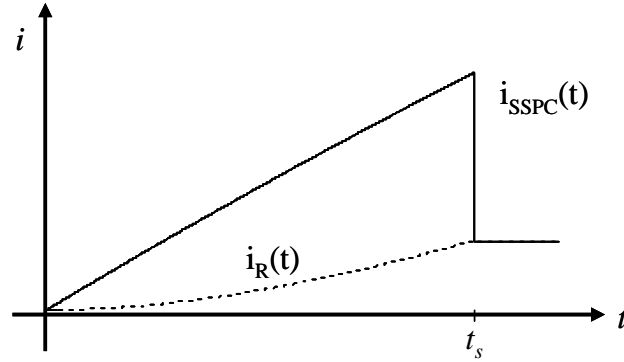
Sumando las ecuaciones (4.10) y (4.15) se puede obtener la expresión de la corriente por el SSPC:

$$i_{SSPC}(t) = i_R(t) + i_C(t) = \frac{k_M \cdot V_{DRIVER}}{Rg \cdot Cg - R \cdot C} \left( Rg \cdot Cg \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}} \right) + R \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1 \right) + R \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}} - e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \right) \right) \quad (4.16)$$

Simplificando la ecuación anterior, se obtiene la expresión que define la corriente por el SSPC:

$$i_{SSPC}(t) = k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}} \right) \quad (4.17)$$

A partir de las expresiones que definen las corrientes por el SSPC y la carga, se puede representar las corrientes por el SSPC y la resistencia, ver Figura 4.6.



**Figura 4.6: Corriente por el SSPC y la resistencia durante la conexión con control pasivo**

Como se puede apreciar en la Figura 4.6 la corriente por el SSPC es prácticamente lineal durante los instantes iniciales de la conexión de una carga muy capacitiva. Esto es debido principalmente a que la rampa de corriente que carga del condensador durante el procedimiento pasivo se produce en tiempos muy inferiores a la constante de tiempo introducida por  $C_g$  y  $R_g$ . De esta forma, para el transitorio, en este tipo de cargas, es posible aproximar el término exponencial de la ecuación (4.17) a partir de la simplificación del polinomio de Taylor de primer orden con la expresión:

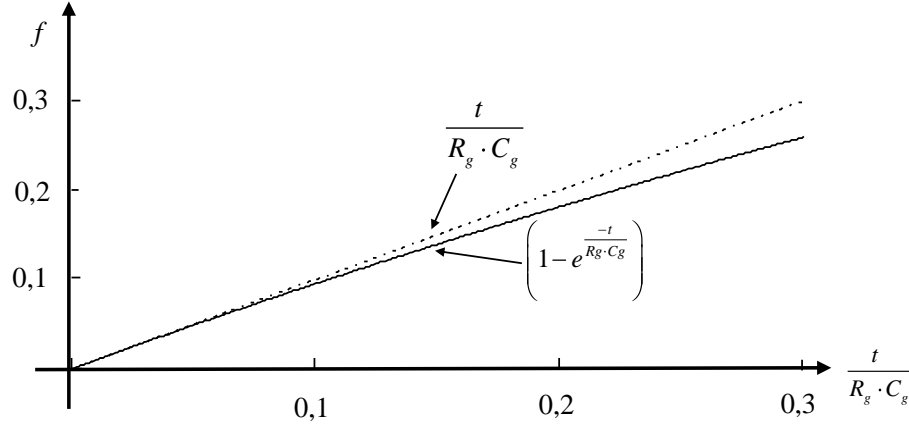
$$e^{\frac{-t}{R_g \cdot C_g}} = 1 - \frac{t}{R_g \cdot C_g} \quad (4.18)$$

Así pues, la corriente con control pasivo por el SSPC aproximada por el polinomio de Taylor de primer orden queda definida por:

$$i_{SSPC}(t) = k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot \frac{t}{R_g \cdot C_g} = k_p \cdot t \quad (4.19)$$

En la Figura 4.7 se puede apreciar como para relaciones entre tiempo de subida y la constante de tiempo,  $\tau_G$ , introducida por  $C_g$  y  $R_g$ , en las cuales el tiempo de subida es muy inferior a la constante de tiempo  $\tau_G$ , el error es inapreciable. Así pues, con el método de control pasivo es posible realizar una aproximación tal que mientras  $\tau_G$  sea el doble del tiempo de subida, el error cometido con la expresión (4.18) es de un 10%; cuando  $\tau_G$  es del orden de tres veces el tiempo de subida, entonces el error cometido con la

aproximación es inferior al 15%. Para escenarios de conexión en los cuales el tiempo de subida es una décima parte de la constante de tiempo la ecuación tiene un error menor al 5%.



**Figura 4.7: Evolución de la exponencial con respecto a la aproximación mediante el polinomio de Taylor**

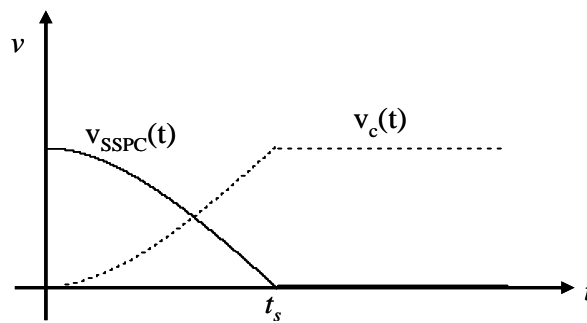
Por otro lado, se puede representar la tensión en el SSPC como:

$$v_{SSPC}(t) = V_{BUS} - v_c(t) \quad (4.20)$$

Teniendo en cuenta la tensión en el condensador (4.14) se obtiene la expresión que nos define la tensión en el SSPC:

$$v_{SSPC}(t) = V_{BUS} - \frac{k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot R}{R_g \cdot C_g - R \cdot C} \left( R_g \cdot C_g \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{R_g \cdot C_g}} \right) + R \cdot C \cdot \left( e^{-\frac{t}{R \cdot C}} - 1 \right) \right) \quad (4.21)$$

De esta forma, se puede representar la tensión en el condensador y en bornes del SSPC, ver Figura 4.11 .

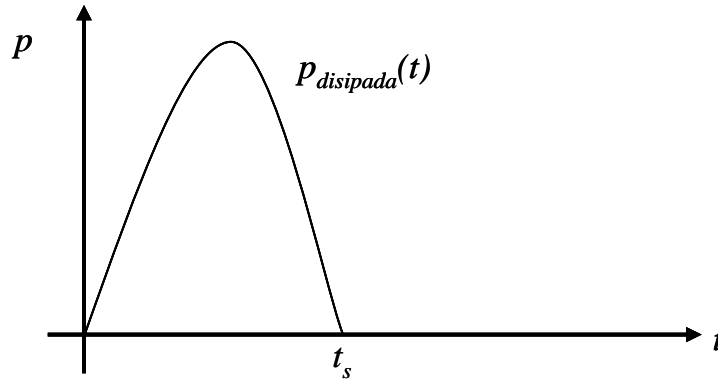


**Figura 4.8: Tensión en la carga y en el SSPC con control pasivo de la tensión de puerta**

De las expresiones que definen la tensión y la corriente en el SSPC, se obtiene la potencia disipada por el dispositivo durante la conmutación con control pasivo, mediante la expresión:

$$p_{SSPC}(t) = k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}}\right) \cdot \left[ V_{BUS} - \frac{k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot R}{Rg \cdot Cg - R \cdot C} \left( Rg \cdot Cg \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}}\right) + R \cdot C \cdot \left(e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1\right) \right) \right] \quad (4.22)$$

La potencia disipada por el SSPC durante la conexión evoluciona según la curva representada en la Figura 4.9.



**Figura 4.9: Potencia disipada por el SSPC, con control pasivo**

Para calcular el instante en el que se disipa la potencia máxima, es necesario calcular la derivada de la expresión de la potencia disipada (4.22) e igualar a cero:

$$\frac{dp_{SSPC}(t)}{dt} = 0 \quad (4.23)$$

La resolución de esta expresión no tiene una solución explícita y es necesario utilizar herramientas de cálculo (como Mathcad), para calcular el tiempo en el que la potencia disipada es máxima, ver Anexo A.

Teniendo en cuenta el tiempo de subida,  $t_s$ , en el que la carga alcanza el valor de la tensión de bus, se puede calcular el valor medio de la potencia disipada durante la transición, mediante la ecuación:

$$P_{Media\_t_s} = \frac{1}{t_s} \cdot \int_0^{t_s} k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{R_g \cdot C_g}}\right) \cdot \left[ V_{BUS} - \frac{k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot R}{R_g \cdot C_g - R \cdot C} \left( R_g \cdot C_g \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{R_g \cdot C_g}}\right) + R \cdot C \cdot \left(e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1\right) \right) \right] \cdot dt \quad (4.24)$$

Si se realiza la integral definida, se obtiene el valor de la potencia media. Para ello de nuevo se ha utilizado la herramienta Mathcad, ver Anexo A. La potencia media disipada durante la conmutación no puede ser superior a la potencia máxima que puede disipar el semiconductor seleccionado durante el tiempo que dura la transición  $t_s$ , ver Anexo A.

A partir de la expresión de la potencia media disipada, durante la conexión de la carga mediante el control pasivo, es posible calcular el número de semiconductores necesarios para realizar el diseño del SSPC. Esto se consigue mediante la relación entre la potencia media y la potencia que es capaz de soportar el dispositivo, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$N_{MOSFET} = \frac{P_{Media\_t_s}}{P_{MAX_{SOA}}} \quad (4.25)$$

#### 4.2.2 Valor máximo de la capacidad del condensador, que se puede conectar mediante el control pasivo

Una vez definidas las ecuaciones que muestran las expresiones de corriente y tensión en el SSPC y en la carga, durante una conexión con control pasivo de la corriente, y teniendo en cuenta que las constantes de tiempo introducidas por  $R_g$  y  $C_g$  son mayores que los tiempos de subida durante la conexión, con control pasivo, de la carga altamente capacitiva, se puede considerar que la corriente evoluciona como una rampa con derivada constante de la corriente, donde la pendiente está fijada por  $k_p$ , ver ecuación (4.19).

Teniendo en cuenta estas características, el cálculo del condensador de carga se puede realizar por diferentes métodos, que se desarrollaran en el apartado relacionado con el control activo con derivada constante de la corriente, ver epígrafe 4.4.

### **4.2.3 Ventajas e inconvenientes del control pasivo de la corriente**

El procedimiento por control pasivo de la corriente por el SSPC está basado en un control clásico de la tensión de puerta-surtidor de un MOSFET. Este tipo de control es muy limitado y no permite la conexión de condensadores elevados en tiempos de conexión pequeños, con corrientes no muy grandes en el SSPC.

Otra desventaja de este procedimiento, está relacionada con los componentes que determinan los tiempos de conexión de las cargas,  $R_g$  y  $C_g$ , los cuales requieren ser modificados para variar los tiempos y corrientes máximas durante la conexión.

La única ventaja de esta estrategia de conexión es la simplicidad del circuito de control y la sencillez en la implementación, que no requiere de muchos elementos pasivos ni de dispositivos activos.

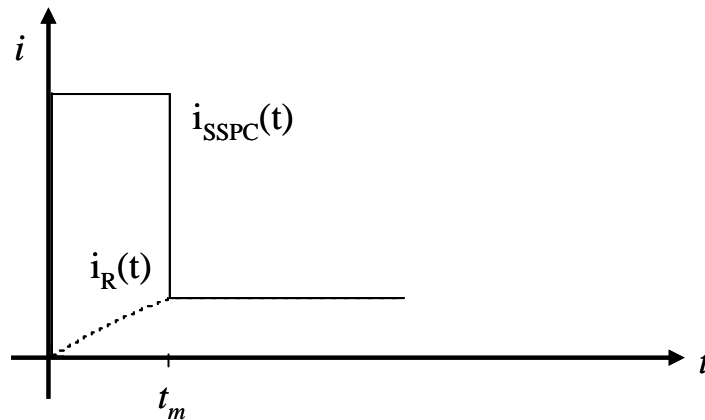
En la Tabla 4.1 se muestran las ecuaciones básicas de funcionamiento del SSPC con control pasivo.

<b>SSPC</b>
$i_{SSPC}(t) = k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot \frac{t}{Rg \cdot Cg} = k_p \cdot t$
$v_{SSPC}(t) = V_{BUS} - \frac{k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot R}{Rg \cdot Cg - R \cdot C} \left( Rg \cdot Cg \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}} \right) + R \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1 \right) \right)$
$p_{SSPC}(t) = k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}} \right) \cdot \left[ V_{BUS} - \frac{k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot R}{Rg \cdot Cg - R \cdot C} \left( Rg \cdot Cg \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}} \right) + R \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1 \right) \right) \right]$
$N_{MOSFET} = \frac{P_{Media\_t_s}}{P_{MAX\_SOA}}$
<b>Resistencia</b>
$i_R(t) = \frac{v_c(t)}{R} = \frac{k_M \cdot V_{DRIVER}}{Rg \cdot Cg - R \cdot C} \left( Rg \cdot Cg \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}} \right) + R \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1 \right) \right)$
$v_R(t) = v_C(t)$
<b>Condensador</b>
$i_c(t) = \frac{k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot R \cdot C}{Rg \cdot Cg - R \cdot C} \cdot \left( e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}} - e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \right)$
$v_c(t) = \frac{k_M \cdot V_{DRIVER} \cdot R}{Rg \cdot Cg - R \cdot C} \left( Rg \cdot Cg \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{Rg \cdot Cg}} \right) + R \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1 \right) \right)$

**Tabla 4.1: Ecuaciones de funcionamiento del SSPC con control pasivo**

### 4.3 Conexión de cargas mediante control activo con corriente constante

Una alternativa a los métodos de conexión de cargas altamente capacitivas con control pasivo, se puede conseguir mediante el uso de circuitos electrónicos de control realimentados, que actúan sobre el *driver* principal que controla al semiconductor encargado de la conmutación. Estos circuitos realizan un control activo de la tensión de puerta, lo cual permite el control de la corriente por el SSPC durante el tiempo que dura la conexión de la carga. En la Figura 4.10 se puede apreciar un ejemplo de control de la corriente constante por el SSPC.



**Figura 4.10: Conexión de la carga con control activo con corriente constante**

Así pues, es posible conectar una carga muy capacitiva, manteniendo, si fuese necesario, un valor de la corriente por encima de la nominal, aunque dentro de las especificaciones del semiconductor, durante un tiempo de conexión determinado.

#### 4.3.1 Cálculo de los principales parámetros de funcionamiento del SSPC durante el transitorio de conexión con control activo con corriente constante.

Teniendo en cuenta que la corriente por el SSPC se mantiene constante durante el transitorio de conexión, la carga recibirá un pulso constante de corriente, produciéndose una evolución de las formas de onda por el SSPC y la resistencia como las representadas en la Figura 4.10.



En este método de conexión con control activo con corriente constante, la condición más favorable desde el punto de vista de reducir los tiempos de conexión, se produce cuando la corriente alcanza el valor máximo permitido por el SSPC, durante el transitorio de conexión de la carga:

$$i_{SSPC}(t) = I_{MAX} \quad (4.26)$$

Una vez finalizado el transitorio de conexión, la corriente alcanzara el valor nominal  $I_{NOM}$ , definido por la expresión:

$$I_{NOM} = \frac{V_{BUS}}{R_{CARGA}} \quad (4.27)$$

Así pues, durante el transitorio de conexión con corriente constante, para una tensión inicial cero en la carga, la tensión en el condensador evoluciona de acuerdo con la ecuación:

$$v_C(t) = \frac{1}{C} \int \left( I_{MAX} - \frac{v_C(t)}{R} \right) \cdot dt \quad (4.28)$$

Derivando la expresión anterior se obtiene la ecuación diferencial:

$$\frac{d v_C(t)}{d t} + \frac{v_C(t)}{C \cdot R} = \frac{I_{MAX}}{C} \quad (4.29)$$

Si se resuelve la ecuación diferencial (4.29) considerando descargado el condensador inicialmente [Piskunov83], se obtiene la evolución del valor de la tensión en la carga durante la conexión:

$$v_C(t) = R \cdot I_{MAX} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{RC}} \right) \quad (4.30)$$

A partir de la tensión en el condensador, se puede obtener la corriente en la resistencia, durante el transitorio como:

$$i_R(t) = \frac{v_C(t)}{R} = I_{MAX} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \right) \quad (4.31)$$

Así pues, teniendo en cuenta (4.26) y (4.31), la corriente en el condensador está definida por la expresión:

$$i_C(t) = i_{SSPC}(t) - i_R(t) = I_{MAX} \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \quad (4.32)$$

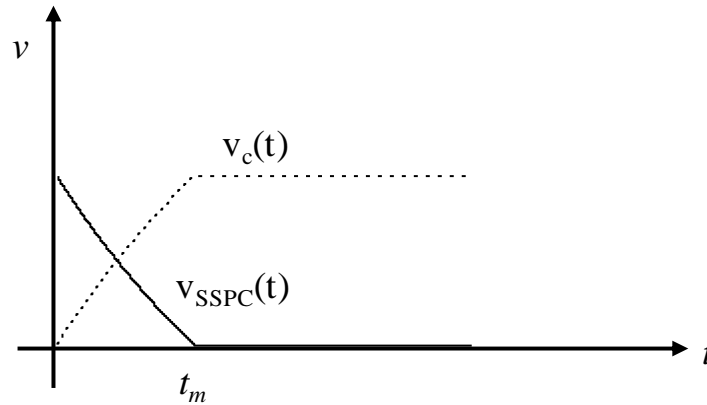
A partir de la tensión en el condensador, se puede obtener la tensión en el SSPC como:

$$v_{SSPC}(t) = V_{BUS} - v_C(t) \quad (4.33)$$

Sustituyendo la tensión del condensador (4.30) se obtiene la expresión que nos define la tensión que soporta el SSPC como:

$$v_{SSPC}(t) = V_{BUS} - R \cdot I_{MAX} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \right) \quad (4.34)$$

De este modo, se puede representar la tensión en bornes del SSPC de acuerdo a la Figura 4.11.

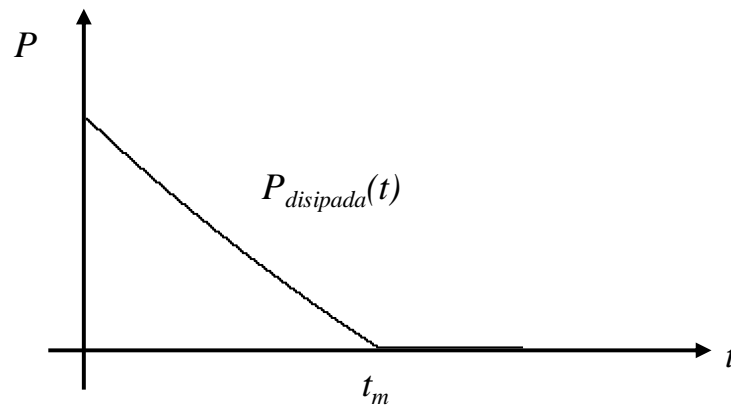


**Figura 4.11: Tensiones en la carga y el SSPC con control activo con corriente constante**

A partir de la tensión y la corriente en el SSPC, se obtiene la expresión de la potencia disipada por el dispositivo durante la conmutación:

$$P_{SSPC}(t) = I_{MAX} \cdot V_{BUS} - R \cdot I_{MAX}^2 \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}}\right) \quad (4.35)$$

La potencia disipada por el SSPC durante el tiempo de conexión,  $t_m$ , evoluciona según la curva representada en Figura 4.12. El máximo siempre se alcanza en el instante inicial de la conexión, lo cual va a condicionar la selección del semiconductor incluido en el SSPC.



**Figura 4.12: Potencia disipada por el SSPC, con control activo con corriente constante**

Teniendo en cuenta el tiempo de mantenimiento de la corriente, se puede calcular el valor medio de la potencia disipada durante el transitorio de conexión, mediante la ecuación:

$$P_{Media\_t_m} = \frac{1}{t_m} \cdot \int_0^{t_m} P_{SSPC}(t) \cdot dt = \frac{1}{t_m} \cdot \int_0^{t_m} \left( I_{MAX} \cdot V_{BUS} - R \cdot I_{MAX}^2 \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}}\right) \right) \cdot dt \quad (4.36)$$

Donde  $t_m$  es el tiempo que dura el transitorio de conexión con corriente constante por el SSPC. Si se resuelve la integral definida se obtiene la expresión que define la potencia media:

$$P_{Media\_t_m} = I_{MAX} \cdot V_{BUS} - R \cdot I_{MAX}^2 + \frac{C \cdot R^2 \cdot I_{MAX}^2}{t_m} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t_m}{R \cdot C}}\right) \quad (4.37)$$

No obstante, es necesario utilizar herramientas de cálculo (como Mathcad), para calcular el tiempo en el que la potencia disipada es máxima, ver Anexo A.

A partir de la expresión de la potencia media, disipada durante la conexión de la carga, es posible calcular el número de semiconductores necesarios para soportar dicho proceso de conexión. Para ello se utilizará la relación entre la potencia media y la potencia que es capaz de soportar el dispositivo, durante el tiempo que dura el transitorio de conexión, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$N_{MOSFET} = \frac{P_{Media-t_m}}{P_{MAX_{SOA}}} \quad (4.38)$$

#### 4.3.2 Valor máximo de la capacidad del condensador, que se puede conectar con control activo con corriente constante

Teniendo en cuenta la expresión (4.30), que representa la evolución de la tensión en el condensador de la carga, se obtiene la ecuación que define el condensador máximo que se puede conectar mediante un SSPC con una corriente constante,  $I_{MAX}$  y un tiempo de conexión  $t_m$ . Para lo cual es necesario igualar la expresión de la tensión en el condensador al final del tiempo de mantenimiento ( $t_m$ ), con la tensión de  $V_{BUS}$ .

$$V_{BUS} = v_C(t_m) = R \cdot I_{MAX} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t_m}{R \cdot C}} \right) \quad (4.39)$$

Despejando el valor del condensador se obtiene la ecuación que nos permite calcular el condensador máximo de carga que es posible conectar a la salida del SSPC:

$$C = \frac{-t_m}{R \cdot \ln \left( 1 - \frac{I_{NOM}}{I_{MAX}} \right)} = \frac{-t_m}{R \cdot \ln 1 - K_I} \quad (4.40)$$

Donde  $K_I$  define la relación entre la corriente nominal y máxima como:

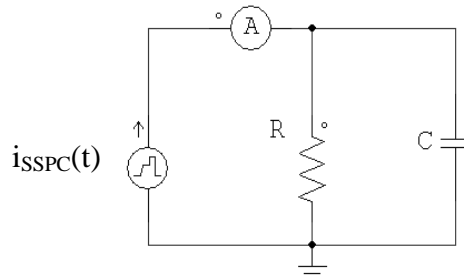
$$\frac{I_{NOM}}{I_{MAX}} = K_I \quad (4.41)$$

Es importante señalar que el valor del condensador máximo que se puede conectar está definido por los tiempos de mantenimiento de la corriente máxima,  $t_m$ , la resistencia de carga,  $R$ , los valores de la corriente máxima,  $I_{MAX}$ , y la corriente nominal,  $I_{NOM}$ .

### 4.3.3 Simulación de la conexión mediante control activo con corriente constante

Una vez han sido calculadas las ecuaciones que definen el condensador máximo que es posible conectar de acuerdo con las distintas variables ( $I_{\text{NOM}}$ ,  $I_{\text{MAX}}$ ,  $t_m$  y  $R$ ), se ha simulado en [PSIM] el circuito de la Figura 4.1, con diferentes valores de corrientes máximas y nominales, así como con diferentes condensadores y tiempos de conexión, calculados a partir de la expresión (4.40).

Para validar las ecuaciones de forma que no se introduzcan errores en los cálculos teóricos como consecuencia de los elementos parásitos ó caídas de tensión en el semiconductor del SSPC, se ha simplificado el circuito real mediante un circuito compuesto de una fuente de corriente programable, Figura 4.13.



**Figura 4.13: Circuito de simulación de la estrategia basada en control activo mediante corriente constante**

Esta fuente permite mantener la corriente constante durante un tiempo indefinido, de modo que se puede obtener el tiempo de conexión, para este caso  $t_m$ , como el intervalo entre el comienzo del escalón de corriente constante y el momento en el que la tensión en la carga alcanza la tensión de bus, ver Figura 4.14.

A partir de los datos de corriente máxima, tensión de bus, corriente nominal, resistencia y capacidad de la carga se obtienen los datos del tiempo de conexión, para este caso  $t_m$ , mediante las hojas de cálculo del Anexo A, ver Tabla 4.2.

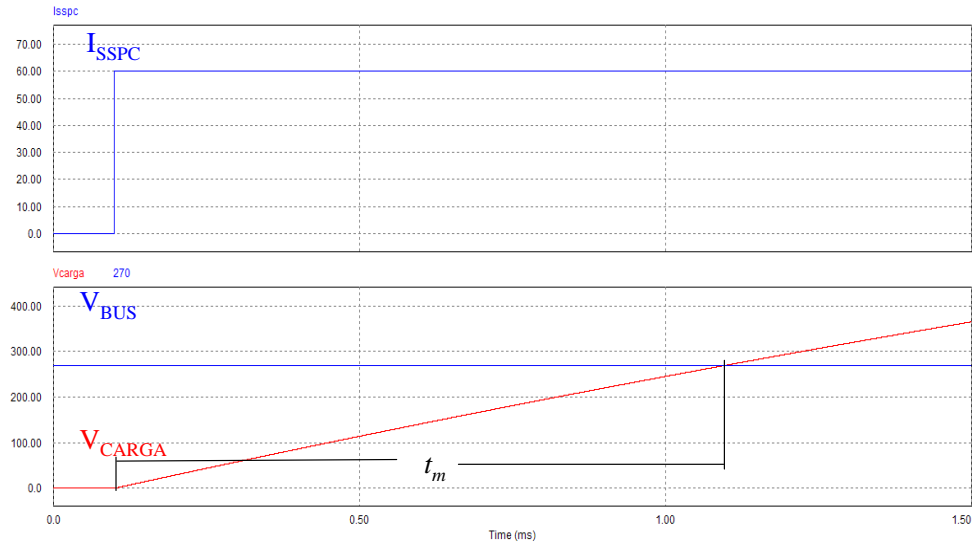


Figura 4.14: Simulación de conexión de carga, con corriente máxima constante

Calculo teórico						Simulación	
$V_{BUS}$ [V]	$I_{MAX}$ [A]	$I_{NOM}$ [A]	$R$ [Ω]	$C$ [μF]	$t_m$ [ms]	$t_m$ [ms]	Error [%]
270	<b>45</b>	10	27	147,373	1	1	0%
270	<b>60</b>	10	27	203,141	1	1	0%
270	<b>75</b>	10	27	258,818	1	1	0%
270	60	<b>5</b>	54	212,829	1	1	0%
270	60	<b>10</b>	27	203,141	1	1	0%
270	60	<b>15</b>	18	193,114	1	1	0%
270	60	10	27	2031,413	<b>10</b>	<b>10</b>	0%
270	60	10	27	203,141	<b>1</b>	<b>1</b>	0%
270	60	10	27	20,314	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	0%

Tabla 4.2: Simulación de la estrategia basada en control activo mediante corriente constante

De este modo, el error se evalúa mediante la comparación del tiempo obtenido en la simulación y el tiempo calculado a partir del Anexo A, de acuerdo con la expresión:

$$Error = \frac{t_{m(teorico)} - t_{m(simulado)}}{t_{m(simulado)}} \cdot 100 \quad (4.42)$$

Teniendo en cuenta los datos teóricos de la Tabla 4.2, es posible validar las expresiones calculadas a lo largo del apartado con los resultados de la simulación. Como era de esperar, dado que la simulación no considera ninguno de los parásitos del sistema, el error cometido siempre es cero.

#### 4.3.4 Ventajas e inconvenientes del control activo con corriente constante

La estrategia de conexión mediante control activo con corriente constante por el SSPC es mejor que el método pasivo, y permite la conexión de condensadores mayores en tiempos de conexión más pequeños. Además, se pueden configurar los tiempos de conexión de las cargas, sin la necesidad de modificaciones hardware del dispositivo.

El inconveniente principal de esta estrategia de conexión es la disipación de potencia producida en el SSPC durante los instantes iniciales y la necesidad de un circuito adicional de control más complejo, que el requerido con el control pasivo, y que puede ser susceptible de perturbaciones.

En la Tabla 4.3 se muestran las ecuaciones básicas de funcionamiento del SSPC con control activo con corriente constante, así como las ecuaciones que permiten calcular las capacidades máximas que se pueden conectar.

<b>SSPC</b>	
$i_{SSPC}(t) = I_{MAX}$	$p_{SSPC}(t) = I_{MAX} \cdot V_{BUS} - R \cdot I_{MAX}^2 \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{RC}}\right)$
$v_{SSPC}(t) = V_{BUS} - R \cdot I_{MAX} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{RC}}\right)$	$N_{MOSFET} = \frac{P_{Media\_t_m}}{P_{MAX\_SOA}}$
<b>Resistencia</b>	<b>Condensador</b>
$i_R(t) = I_{MAX} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{RC}}\right)$	$i_C(t) = I_{MAX} \cdot e^{\frac{-t}{RC}}$
$v_C(t) = R \cdot I_{MAX} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{RC}}\right)$	
<b>Capacidad Máxima</b>	
$C = \frac{-t_m}{R \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{NOM}}{I_{MAX}}\right)} = \frac{-t_m}{R \cdot \ln 1 - K_I}$	

**Tabla 4.3: Ecuaciones de funcionamiento del SSPC con control activo con corriente constante**



#### 4.4 Conexión mediante control activo con derivada constante de la corriente

La conexión de la carga mediante el mantenimiento de la corriente constante implica que el semiconductor tiene que soportar elevadas potencias durante los instantes iniciales. Para disminuir estos valores se puede utilizar un segundo método, el cual consiste en realizar la conexión de la carga, ver Figura 4.1, mediante una rampa de corriente, siendo la derivada de esta corriente por el SSPC constante, y siempre limitando el valor máximo de la corriente por debajo de la corriente máxima de funcionamiento del SSPC, ver Figura 4.15.

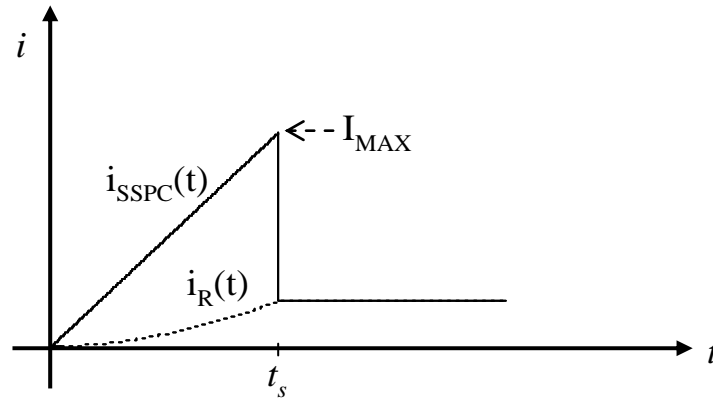


Figura 4.15: Conexión de la carga con control de la tensión de puerta

##### 4.4.1 Cálculo de los principales parámetros de funcionamiento del SSPC durante el transitorio de conexión con derivada constante de la corriente

Cuando se controla la corriente que circula por el SSPC de forma que se impone una corriente creciente con forma de rampa durante el transitorio de conexión, una parte de la corriente que circula por el SSPC atraviesa la resistencia y otra parte de la corriente carga el condensador, ver Figura 4.15. Por otro lado, el condensador se carga lentamente y una vez cargado, toda la corriente entregada por el SSPC circula por la resistencia. De este modo, para esta estrategia de conexión, la corriente por el SSPC durante el transitorio de conexión se puede definir por la expresión:

$$i_{SSPC}(t) = k_1 \cdot t \quad (4.43)$$

Donde la constante  $k_1$ , representa la pendiente de la rampa, la cual depende del tiempo de subida de la corriente ( $t_s$ ) y de la corriente máxima alcanzada durante el transitorio de la conexión:

$$k_1 = \frac{I_{MAX}}{t_s} \quad (4.44)$$

Una vez finalizado el transitorio de conexión, la corriente alcanzara el valor nominal  $I_{NOM}$ , definido por la expresión:

$$I_{NOM} = \frac{V_{BUS}}{R_{CARGA}} \quad (4.45)$$

Teniendo en cuenta la corriente por el SSPC, se puede calcular la corriente por el condensador a partir de la expresión:

$$i_{SSPC}(t) = i_c(t) + \frac{v_c(t)}{R} = i_c(t) + \frac{1}{R \cdot C} \cdot \int i_c(t) \cdot dt \quad (4.46)$$

Igualando las dos ecuaciones que definen el comportamiento de la corriente durante el transitorio de conexión (4.43) y (4.46), se obtiene la expresión:

$$k_1 \cdot t = i_c(t) + \frac{1}{R \cdot C} \cdot \int i_c(t) \cdot dt \quad (4.47)$$

Si se deriva la expresión (4.47) se obtiene la ecuación diferencial:

$$k_1 = \frac{di_c(t)}{dt} + \frac{i_c(t)}{R \cdot C} \quad (4.48)$$

Donde la solución de la ecuación diferencial no homogénea queda definida por la siguiente ecuación:

$$i_c(t) = k_1 \cdot R \cdot C + CTE3 \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \quad (4.49)$$

Para calcular la solución particular hay que tener en cuenta que inicialmente la corriente por el SSPC es cero, y con ello la corriente por el condensador y la resistencia de carga también será cero:

$$i_c(0) = 0 \quad (4.50)$$

Sustituyendo la condición de contorno en la ecuación (4.49), se obtiene la ecuación que rige el comportamiento de la corriente por el condensador durante la conexión de la carga:

$$i_c(t) = k_1 \cdot R \cdot C \cdot (1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}}) \quad (4.51)$$

A partir de la corriente por el condensador, la tensión del condensador viene definida como:

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \cdot \int i_c(t) \cdot dt = \frac{1}{C} \cdot \int k_1 \cdot R \cdot C \cdot (1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}}) \cdot dt \quad (4.52)$$

De la resolución de la integral indefinida se obtiene, la expresión que define la evolución de la tensión en el condensador:

$$v_c(t) = k_1 \cdot R \cdot t + k_1 \cdot R^2 \cdot C \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}} + CTE4 \quad (4.53)$$

Para calcular la constante (CTE4), se sustituye las condiciones iniciales de tensión en el condensador, el cual se encuentra inicialmente descargado:

$$v_c(t_0) = 0 \quad (4.54)$$

A partir de estas dos expresiones se obtiene la ecuación de la tensión en el condensador:

$$v_c(t) = k_1 \cdot R \cdot t - k_1 \cdot R^2 \cdot C \cdot (1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}}) \quad (4.55)$$

Teniendo en cuenta la tensión en el condensador, la corriente en la resistencia está definida por la expresión:

$$i_r(t) = \frac{v_c(t)}{R} = k_1 \cdot t - k_1 \cdot R \cdot C \cdot (1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}}) \quad (4.56)$$

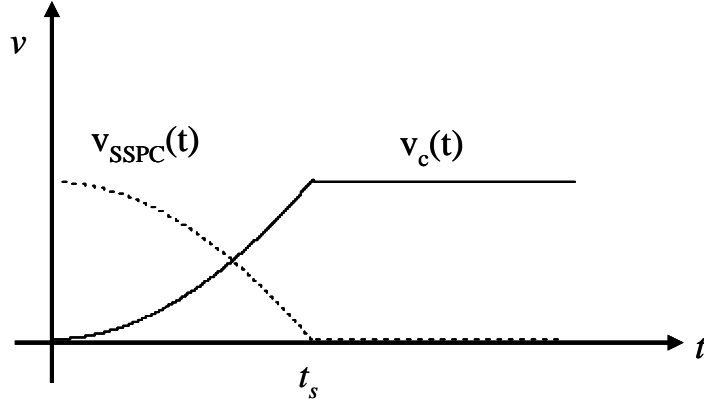
Por otro lado, se puede representar la tensión en el SSPC como:

$$v_{SSPC}(t) = V_{BUS} - v_c(t) \quad (4.57)$$

Sustituyendo la tensión en el condensador se obtiene la expresión que nos define la tensión en el SSPC.

$$V_{SSPC}(t) = V_{BUS} - k_1 \cdot R \cdot t + k_1 \cdot R^2 \cdot C \cdot (1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}}) \quad (4.58)$$

De esta forma se puede representar la evolución de la tensión en el condensador y en bornes del SSPC, ver Figura 4.16. La tensión en el SSPC evoluciona de forma similar a la que se produce con una estrategia de conexión mediante control pasivo.

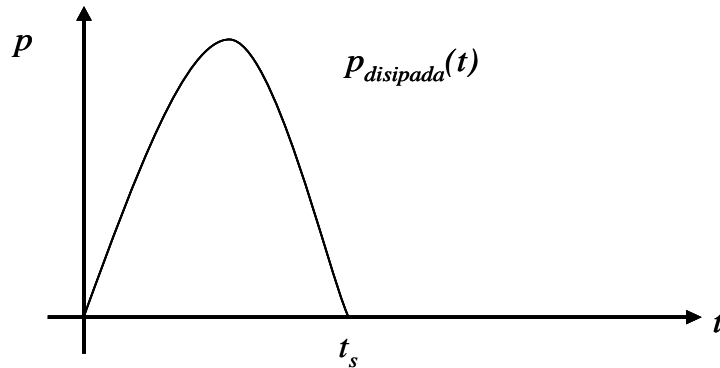


**Figura 4.16: Tensión de la carga y en el SSPC con derivada constante de la corriente**

A partir de la tensión y la corriente en el SSPC, se obtiene la potencia disipada por el dispositivo durante la conmutación, mediante la expresión:

$$p_{SSPC}(t) = i_{SSPC}(t) \cdot v_{SSPC}(t) = k_1 \cdot t \cdot [V_{BUS} - k_1 \cdot R \cdot t + k_1 \cdot R^2 \cdot C \cdot (1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}})] \quad (4.59)$$

La cual evoluciona según la curva representada en la Figura 4.17.



**Figura 4.17: Potencia disipada por el SSPC con derivada constante de la corriente**

Al igual que en el apartado anterior con control pasivo, para calcular el instante en el que se disipa la potencia máxima, es necesario calcular la derivada de la expresión de la potencia disipada en función del tiempo, (4.59), e igualar a cero, de este modo se obtiene una ecuación de la forma:

$$\frac{dp_{SSPC}(t)}{dt} = k_1 \cdot [V_{BUS} - 2 \cdot k_1 \cdot R \cdot t + k_1 \cdot R^2 \cdot C \cdot (1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}} + \frac{t}{R \cdot C} \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}})] = 0 \quad (4.60)$$

La resolución de esta derivada no tiene una solución explícita y es necesario utilizar herramientas de cálculo (como Mathcad), para calcular el tiempo en el que la potencia disipada es máxima, ver Anexo A.

Por otro lado, teniendo en cuenta el tiempo de subida es el tiempo que tarda la carga en alcanzar el valor de la tensión de bus, se puede calcular el valor medio de la potencia disipada durante la transición con la ecuación:

$$P_{Media\_t_s} = \frac{1}{t_s} \cdot \int_0^{t_s} p_{SSPC}(t) \cdot dt = \frac{1}{t_s} \cdot \int_0^{t_s} k_1 \cdot t \cdot \left( V_{BUS} - k_1 \cdot R \cdot t + k_1 \cdot R^2 \cdot C \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \right) \right) \cdot dt \quad (4.61)$$

Si se realiza la integral definida, se obtiene el valor de la potencia media, que está asociada con la siguiente expresión:

$$P_{Media\_t_s} = \frac{1}{t_s} \cdot \left[ \left( \frac{k_1 \cdot V_{BUS} + k_1^2 \cdot R^2 \cdot C}{2} - \frac{k_1^2 \cdot R \cdot t_s}{3} \right) \cdot t_s^2 - k_1^2 \cdot R^4 \cdot C^3 + k_1^2 \cdot R^3 \cdot C^2 \cdot e^{\frac{-t_s}{R \cdot C}} (R \cdot C + t_s) \right] \quad (4.62)$$

A partir de la expresión de la potencia media disipada durante la conexión de la carga mediante la estrategia de derivada de corriente constante, es posible calcular el número de semiconductores necesarios para realizar el diseño del SSPC. Esto se consigue mediante la relación entre la potencia media y la potencia que es capaz de soportar el dispositivo, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$N_{MOSFET} = \frac{P_{Media\_t_s}}{P_{MAX_{SOA}}} \quad (4.63)$$

#### 4.4.2 Valor máximo de la capacidad del condensador, que se puede conectar con control activo con derivada constante de la corriente

A partir de las expresiones de corriente y tensión del SSPC, calculadas en el apartado anterior, también es posible obtener el condensador máximo que se puede conectar al SSPC dado una corriente  $I_{MAX}$  y un tiempo de conexión  $t_s$ . En los siguientes apartados se presentan los estudios realizados para encontrar el método más preciso de cálculo, que permita obtener el condensador máximo que es posible conectar.

##### 4.4.2.1 Cálculo del condensador máximo: método exacto

Para calcular condensador máximo que es posible cargar hasta la  $V_{BUS}$  en un tiempo de subida “ $t_s$ ”, es necesario realizar el balance de corrientes, teniendo en cuenta que al finalizar el tiempo de subida ( $t_s$ ), las corrientes cumplen la expresión:

$$i_c(t_s) + i_R(t_s) = I_{MAX} \quad (4.64)$$

Sustituyendo la expresión (4.45) y (4.51) se obtiene la ecuación:

$$k_1 \cdot R \cdot C \cdot (1 - e^{\frac{-t_s}{R \cdot C}}) + I_{NOM} = I_{MAX} \quad (4.65)$$

A partir de esta expresión se puede despejar el término exponencial de la siguiente forma:

$$e^{\frac{-t_s}{R \cdot C}} = 1 - \frac{I_{MAX} - I_{NOM}}{I_{MAX} \cdot R \cdot C} \cdot t_s \quad (4.66)$$

Esta ecuación tiene el valor de la capacidad incluido en la exponencial, por lo que no es inmediato el cálculo explícito de este parámetro.

Dada la complejidad de la expresión hallada, debido principalmente al término exponencial de la ecuación, es necesario utilizar programas específicos para su resolución. La segunda opción es emplear expresiones matemáticas que permitan simplificarla y obtener el valor de la capacidad.

##### 4.4.2.2 Cálculo del condensador máximo: mediante el polinomio de Taylor orden 3°

Como se ha detallado en el apartado anterior no es viable despejar de manera explícita el valor del condensador a partir de las expresiones exactas. Por lo tanto, es necesario realizar algún tipo de simplificación. Si se considera que la parte correspondiente a la

función exponencial de la ecuación (4.66), se puede expresar por el polinomio de Taylor [Piskunov83] hasta su cuarto término, de la siguiente forma:

$$e^{\frac{-t_s}{R \cdot C}} = \left( 1 - \frac{t_s}{R \cdot C} + \frac{t_s^2}{2 \cdot R^2 \cdot C^2} - \frac{t_s^3}{6 \cdot R^3 \cdot C^3} \right) \quad (4.67)$$

Igualando las ecuaciones (4.66) y (4.67):

$$1 - \frac{I_{MAX} - I_{NOM}}{I_{MAX}} \cdot R \cdot C \cdot t_s = \left( 1 - \frac{t_s}{R \cdot C} + \frac{t_s^2}{2 \cdot R^2 \cdot C^2} - \frac{t_s^3}{6 \cdot R^3 \cdot C^3} \right) \quad (4.68)$$

Y simplificándola se obtiene la ecuación cuadrática:

$$C^2 \cdot V_{BUS} - \frac{1}{2} I_{MAX} \cdot t_s \cdot C + I_{MAX} \cdot \frac{t_s^2}{6 \cdot R} = 0 \quad (4.69)$$

A partir de la expresión cuadrática, se puede calcular el valor del condensador máximo mediante la expresión:

$$C = t_s \cdot \frac{I_{MAX} + \sqrt{I_{MAX}^2 - \frac{8 \cdot V_{BUS} \cdot I_{MAX}}{3 \cdot R}}}{4 \cdot V_{BUS}} \quad (4.70)$$

Esta ecuación resulta ser una buena aproximación, no obstante el error cometido al realizar el balance de cargas con el condensador obtenido, en algunos casos, llega a superar el 10% ante determinadas cargas, por lo que se necesita un método más preciso que permita el cálculo del condensador máximo que es posible conectar para esta estrategia de conexión.

#### 4.4.2.3 Calculo del condensador máximo: mediante el polinomio de Taylor orden 4º

Se puede obtener un método con un error menor en comparación con la ecuación (4.70), si se simplifica la función exponencial, de acuerdo con el polinomio de Taylor hasta su quinto término [Piskunov83], el cual tiene la siguiente forma:

$$e^{\frac{-t_s}{R \cdot C}} = \left( 1 - \frac{t_s}{R \cdot C} + \frac{t_s^2}{2 \cdot R^2 \cdot C^2} - \frac{t_s^3}{6 \cdot R^3 \cdot C^3} + \frac{t_s^4}{24 \cdot R^4 \cdot C^4} \right) \quad (4.71)$$

Igualando las ecuaciones (4.66) y (4.71):

$$1 - \frac{I_{MAX} - I_{NOM}}{I_{MAX} \cdot R \cdot C} \cdot t_s = \left( 1 - \frac{t_s}{R \cdot C} + \frac{t_s^2}{2 \cdot R^2 \cdot C^2} - \frac{t_s^3}{6 \cdot R^3 \cdot C^3} + \frac{t_s^4}{24 \cdot R^4 \cdot C^4} \right) \quad (4.72)$$

Y simplificándola se obtiene la ecuación cúbica:

$$\frac{I_{NOM}}{I_{MAX}} \cdot R^3 \cdot C^3 - \frac{t_s}{2} \cdot R^2 \cdot C^2 + \frac{t_s^2}{6} R \cdot C - \frac{t_s^3}{24} = 0 \quad (4.73)$$

Resolviendo la ecuación cúbica, se puede obtener el valor del condensador máximo, que es posible conectar con un pulso de corriente controlado mediante este método activo:

$$C = \frac{t_s}{6 \cdot R \cdot K_I} \cdot \left[ 1 + \frac{\left[ \sqrt[3]{-1 + 3 \cdot K_I - 4.5 \cdot K_I^2 + \frac{\sqrt{8 - 48 \cdot K_I + 130 \cdot K_I^2 - 140 \cdot K_I^3 + 81 \cdot K_I^4}}{2}} \right]^2 - 2 \cdot K_I + 1}{\sqrt[3]{-1 + 3 \cdot K_I - 4.5 \cdot K_I^2 + \frac{\sqrt{8 - 48 \cdot K_I + 130 \cdot K_I^2 - 140 \cdot K_I^3 + 81 \cdot K_I^4}}{2}}} \right] \quad (4.74)$$

Donde la relación de las corrientes está definida como:

$$\frac{I_{NOM}}{I_{MAX}} = K_I \quad (4.75)$$

Con esta expresión se calcula el valor del condensador máximo que es posible conectar mediante la estrategia de control activo por derivada de corriente constante, con un error menor al que se obtiene con la ecuación (4.70), donde se utilizó la aproximación por el polinomio de Taylor de tercer orden.

#### 4.4.2.4 Método simplificado por aproximación gráfica

La carga entregada por el SSPC,  $Q_{SSPC}$ , es igual a la suma de las cargas que reciben el condensador y la resistencia. Además, la carga entregada por el SSPC,  $Q_{SSPC}$ , depende de la corriente máxima y del tiempo de subida de la corriente, ver Figura 4.15, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Q_{SSPC} = \frac{1}{2} \cdot I_{MAX} \cdot t_s = Q_C + Q_R \quad (4.76)$$



Siendo  $Q_R$  la carga entregada a la resistencia y  $Q_C$  la carga entregada al condensador, la cual se puede expresar con la ecuación [Serway92]:

$$Q_C = C \cdot V_{BUS} \quad (4.77)$$

Por otro lado, la carga entregada a la resistencia,  $Q_R$ , está definida por:

$$Q_R = \int_0^{t_s} \frac{v_c(t)}{R} dt \quad (4.78)$$

Realizando la integral se obtiene la expresión:

$$Q_R = k_1 \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot t_s^2 - t_s \cdot R \cdot C + R^2 \cdot C^2 - R^2 \cdot C^2 \cdot e^{\frac{-t_s}{RC}} \right) \quad (4.79)$$

Esta expresión no permite calcular, de manera explícita, el valor del condensador cuando se sustituye en (4.76).

No obstante, como se puede observar en la Figura 4.15, la evolución de la corriente por la resistencia  $i_R(t)$  se puede aproximar por una parábola que pasa por 0, en  $t=0$ , y que tiene un valor igual a  $I_{NOM}$ , cuando  $t=t_s$ , definida como:

$$i_R(t) \approx i_{R\_APROXIMADA}(t) = \frac{I_{NOM}}{t_s^2} \cdot t^2 \quad (4.80)$$

Por lo tanto, la carga encerrada bajo la curva definida por la ecuación (4.80), se puede calcular mediante la integral desde 0 a  $t_s$  de  $i_{R\_APROXIMADA}(t)$ :

$$Q_{R\_APROXIMADA} = \int_0^{t_s} i_{R\_APROXIMADA}(t) \cdot dt = \int_0^{t_s} \frac{I_{NOM}}{t_s^2} \cdot t^2 \cdot dt = \frac{1}{3} \cdot I_{NOM} \cdot t \quad (4.81)$$

A partir de la expresión aproximada y teniendo en cuenta las especificaciones de conexión se comprueba el error cometido con la expresión aproximada de la carga entregada a la resistencia (4.81), ver Tabla 4.4.

Como se puede apreciar los errores cometidos no superan el 4% para todo el rango de casos estudiados, que contemplan los valores típicos aproximados de diseño de un SSPC actual.

Parámetros de conexión						Carga entregada a la resistencia		
$V_{BUS}$ [V]	$I_{MAX}$ [A]	$I_{NOM}$ [A]	$R$ [Ω]	$C$ [μF]	$t_s$ [ms]	$Q_{R\_EXACTA}$ [A·ms]	$Q_{R\_APROXIMADA}$ [A·ms]	Error [%]
270	45	10	27	70,988	1	3,42	3,333	2,53%
270	60	10	27	98,765	1	3,426	3,333	2,70%
270	75	10	27	126,543	1	3,406	3,333	2,13%
270	60	5	54	104,938	1	1,685	1,667	1,09%
270	60	15	18	92,593	1	5,198	5	3,81%
270	60	10	27	987,654	10	34	33,333	1,96%
270	60	10	27	9,877	0,1	0,3423	0,333	2,62%

**Tabla 4.4: Comparativa del error cometido en la expresión aproximada que define la carga en la resistencia**

A partir de la expresión que define la carga entregada a la resistencia (4.81) y sustituyendo en la ecuación (4.76), se obtiene la ecuación:

$$Q_{SSPC} = \frac{1}{2} I_{MAX} \cdot t_s = C \cdot V_{BUS} + \frac{1}{3} \cdot I_{NOM} \cdot t_s \quad (4.82)$$

Para evaluar el error introducido en la expresión (4.82), una vez realizada la aproximación, se compara la carga entregada por el SSPC de acuerdo con la suma de las expresiones exactas (4.77) y (4.79), con la carga calculada a partir de la expresión simplificada (4.82), ver Tabla 4.5.

Como se puede apreciar en la Tabla 4.5, el error es despreciable en todo el rango de valores, y en todos los casos es menor del 0,7%. Esto es debido al pequeño valor de la carga entregada a la resistencia, en comparación con la carga entregada al condensador por el SSPC.

Teniendo en cuenta los puntos anteriores, se puede concluir que la aproximación (4.82) es adecuada, para el rango de corriente nominal, corriente máxima, valores de tiempos de conexión, resistencias y condensadores de carga especificados para los SSPC objetivo.

Parámetros de conexión						Carga entregada por el SSPC		
V <sub>BUS</sub> [V]	I <sub>MAX</sub> [A]	I <sub>NOM</sub> [A]	R [Ω]	C [μF]	t <sub>s</sub> [ms]	Q <sub>SSPC_EXACTA</sub> [A·ms]	Q <sub>SSPC_APROXIMADA</sub> [A·ms]	Error [%]
270	45	10	27	70,988	1	22,62	22,5	0,53%
270	60	10	27	98,765	1	30,09	30	0,30%
270	75	10	27	126,543	1	37,57	37,5	0,19%
270	60	5	54	104,938	1	30,02	30	0,07%
270	60	15	18	92,593	1	30,2	30	0,66%
270	60	10	27	987,654	10	300,9	300	0,30%
270	60	10	27	9,877	0,1	3,009	3	0,30%

**Tabla 4.5: Comparativa del error cometido en la expresión de carga entregada por el SSPC: Expresión exacta (4.77) más (4.79), frente expresión aproximada (4.82)**

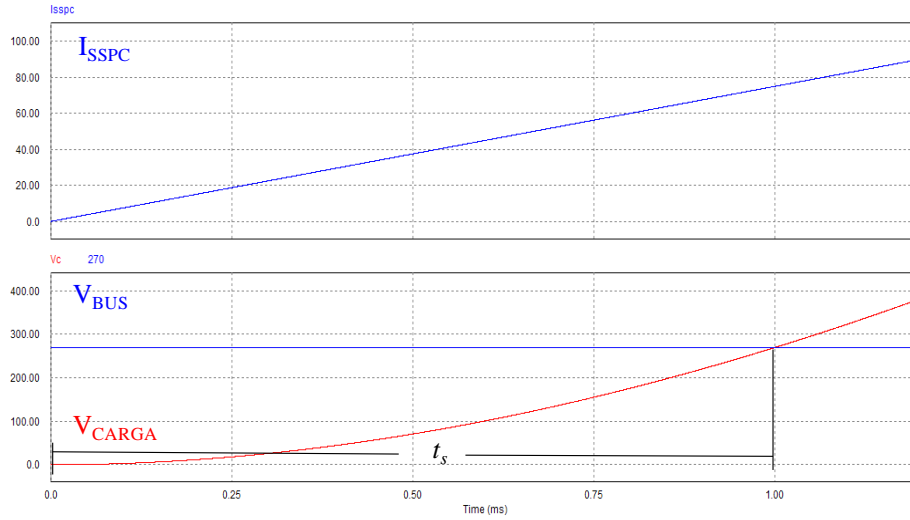
Despejando la ecuación (4.82) se obtiene la expresión que proporciona el valor del condensador máximo:

$$C = \frac{t_s}{R} \cdot \left( \frac{I_{MAX}}{2 \cdot I_{NOM}} - \frac{1}{3} \right) = \frac{t_s}{R} \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot K_I} - \frac{1}{3} \right) \quad (4.83)$$

Teniendo en cuenta los errores cometidos se utilizará esta aproximación para el cálculo del condensador, ya que presenta menor error que las aproximaciones realizadas por Taylor.

#### 4.4.3 Simulación de la conexión con control activo con derivada constante de la corriente

Una vez se han calculado las ecuaciones que definen el condensador máximo que se puede conectar de acuerdo con las distintas variables (I<sub>NOM</sub>, I<sub>MAX</sub>, t<sub>s</sub> y R), es posible realizar las diferentes simulaciones que permitan validar las expresiones con diferentes valores de corrientes máximas y nominales, así como con diferentes condensadores y tiempos de conexión, calculados a partir de la expresión (4.83), ver Figura 4.18.



**Figura 4.18: Simulación de conexión de carga, con derivada constante de la corriente**

Para lo cual se ha utilizado un circuito de simulación similar al del caso de control activo mediante corriente constante, ver Figura 4.13, con diferente programación de los niveles de corriente. El circuito usado permite mantener la derivada de la corriente constante durante un tiempo indefinido, de este modo se puede obtener el tiempo de conexión, para este caso  $t_s$ , como el intervalo comprendido entre el comienzo de la rampa de derivada corriente constante y el momento en el que la tensión en la carga alcanza la tensión de bus, ver Tabla 4.6.

A partir de los datos de corriente tensión de bus, corriente nominal, resistencia y capacidad de la carga se obtienen los datos del tiempo de conexión, para este caso  $t_s$ , mediante las hojas de cálculo del Anexo A, ver Tabla 4.6

El error se evalúa mediante la comparación del tiempo obtenido en la simulación y el tiempo calculado a partir del Anexo A, basado en la expresión (4.83), de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$Error = \frac{t_{s(teorico)} - t_{s(simulado)}}{t_{s(simulado)}} \cdot 100 \quad (4.84)$$

Calculo teórico						Simulación	
$V_{BUS}$ [V]	$I_{MAX}$ [A]	$I_{NOM}$ [A]	$R$ [Ω]	$C$ [μF]	$t_s$ [ms]	$t_s$ [ms]	Error [%]
270	<b>45</b>	10	27	70,988	1	1,00337	0,336%
270	<b>60</b>	10	27	98,765	1	1,00179	0,179%
270	<b>75</b>	10	27	126,543	1	1,00111	0,111%
270	60	<b>5</b>	54	104,938	1	1,00041	0,041%
270	60	<b>10</b>	27	98,765	1	1,00179	0,179%
270	60	<b>15</b>	18	92,593	1	1,00438	0,436%
270	60	10	27	987,654	10	10,018	0,180%
270	60	10	27	98,765	1	1,00179	0,179%
270	60	10	27	9,877	0,1	0,10018	0,180%

**Tabla 4.6: Simulación de la estrategia basada en control activo mediante derivada de corriente constante**

Como se puede apreciar el error cometido siempre está por debajo del 0,5%. Así pues, se puede deducir de la expresión (4.83), es aplicable al rango de valores especificados.

#### 4.4.4 Ventajas e inconvenientes del control activo con derivada constante de la corriente

El procedimiento por control activo con derivada constante de la corriente por el SSPC es también mejor que el método pasivo, y permite la conexión de condensadores elevados en tiempos de conexión pequeños, aunque tiempos mayores si lo comparamos con el método de control activo por corriente constante. No obstante, la disipación de potencia es menor que en el anterior método de conexión activo. Por otro lado, se pueden configurar los tiempos de conexión de las cargas, sin necesidad de modificaciones hardware del dispositivo, al igual que el control activo con corriente constante.

El inconveniente principal de esta estrategia de conexión, al igual que el control activo con corriente constante, es la complejidad del circuito de control requerido que influye en el tamaño del SSPC y el cual puede ser susceptible de perturbaciones.

En la Tabla 4.7 se muestran las ecuaciones básicas de funcionamiento del SSPC con control activo con derivada constante de la corriente, así como las ecuaciones que permiten calcular las capacidades máximas que se pueden conectar.

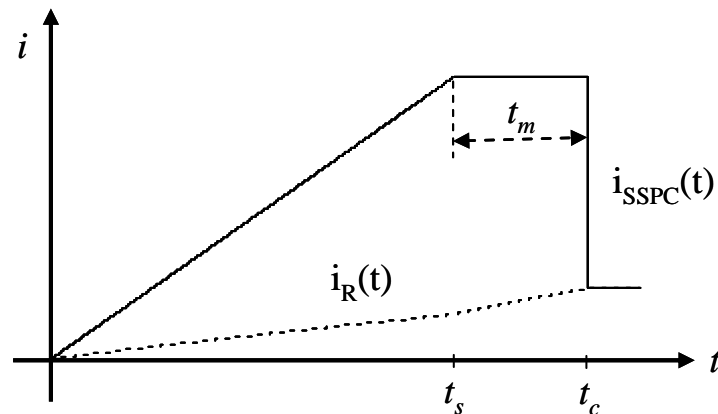
<b>SSPC</b>	
$i_{SSPC}(t) = k_1 \cdot t = \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot t$	
$v_{SSPC}(t) = V_{BUS} - \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R \cdot t + \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R^2 \cdot C \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}}\right)$	
$p_{SSPC}(t) = \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot t \cdot [V_{BUS} - \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R \cdot t + \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R^2 \cdot C \cdot (1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}})]$	
$N_{MOSFET} = \frac{P_{Media\_t_s}}{P_{MAX_{SOA}}}$	
<b>Resistencia</b>	
$i_R(t) = \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot t - \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R \cdot C \cdot (1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}})$	$v_R(t) = v_C(t)$
<b>Condensador</b>	
$i_c(t) = \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R \cdot C \cdot (1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}})$	
$v_c(t) = \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot \left(R \cdot t - R^2 \cdot C \cdot (1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}})\right)$	
<b>Capacidad Máxima</b>	
$C = \frac{t_s}{R} \cdot \left(\frac{I_{MAX}}{2 \cdot I_{NOM}} - \frac{1}{3}\right) = \frac{t_s}{R} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot K_I} - \frac{1}{3}\right)$	

**Tabla 4.7: Ecuaciones de funcionamiento del SSPC con control activo con derivada constante de la corriente**

## 4.5 Conexión de cargas mediante control activo generalizado

Teniendo en cuenta los procedimientos descritos en los apartados anteriores, denominados conexión de cargas con control activo con corriente constante, apartado (4.3), y con derivada constante de la corriente, apartado (4.4), por el SSPC, se puede conectar una carga mediante un control activo que disminuya la potencia disipada por el semiconductor y permita reducir al máximo los tiempos de conexión, a partir de la combinación de estos dos métodos ya descritos anteriormente.

Así pues, el método de control activo generalizado está dividido en dos partes. Al inicio de la conexión utiliza la estrategia por derivada de corriente constante hasta alcanzar un determinado valor de la corriente por el SSPC, seleccionado por diseño. Una vez alcanzado este valor se mantiene la corriente constante durante un determinado periodo de tiempo, hasta cargar completamente el condensador, ver Figura 4.19.



**Figura 4.19: Conexión de la carga mediante control activo generalizado**

Al igual que en las estrategias de control activo descritas anteriormente, una parte de la corriente que circula por el SSPC atraviesa la resistencia y la otra parte de la corriente carga el condensador, durante los instantes iniciales.

#### 4.5.1 Cálculo de los principales parámetros de funcionamiento del SSPC durante el transitorio de conexión con control activo generalizado

El tiempo de conexión ( $t_c$ ) viene determinado por el tiempo de subida ( $t_s$ ) y el tiempo ( $t_m$ ) de mantenimiento, como indica la expresión (4.85):

$$t_c = t_s + t_m \quad (4.85)$$

Por lo tanto, durante los instantes iniciales de la conexión se produce la carga del condensador en dos tramos bien diferenciados. En la primera parte, durante el tiempo de subida, la corriente de conexión por el SSPC viene definida por la expresión (4.86):

$$i_{SSPC}(t) = k_1 \cdot t \quad (4.86)$$

Donde la constante  $k_1$  representa la pendiente de la rampa, la cual depende del tiempo de subida de la corriente y de la corriente máxima alcanzada durante la carga del condensador:

$$k_1 = \frac{I_{MAX}}{t_s} \quad (4.87)$$

Una vez alcanzado el valor máximo de la corriente comienza la segunda parte de la conexión, donde se mantiene la corriente por el SSPC igual a la  $I_{MAX}$ . Una vez finalizado el transitorio de conexión, la corriente alcanza el valor nominal  $I_{NOM}$ , definido por la expresión:

$$I_{NOM} = \frac{V_{BUS}}{R_{CARGA}} \quad (4.88)$$

Teniendo en cuenta los cálculos realizados en la ecuación (4.55), la tensión en el condensador, durante el tiempo de subida está definida por la expresión:

$$v_{c1}(t) = k_1 \cdot R \cdot t + k_1 \cdot R^2 \cdot C \cdot (e^{\frac{-t}{RC}} - 1) \quad (4.89)$$

Por otro lado, si se resuelve la ecuación diferencial (4.29) considerando cargado el condensador inicialmente [Piskunov83], se obtiene la evolución del valor de la tensión en la carga durante el segundo tramo de la conexión:



$$v_{c2}(t) = v_{c1}(t_s) + R \cdot I_{MAX} - v_{c1} \cdot t_s \cdot \left( 1 - e^{\frac{-(t-t_s)}{R \cdot C}} \right) \quad (4.90)$$

Sustituyendo el valor de  $v_{c1}(t)$  en la expresión (4.90) se obtiene la ecuación que define la tensión en el condensador durante el segundo tramo de la conexión:

$$v_{c2}(t) = R \cdot I_{MAX} + k_1 \cdot R^2 \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - e^{\frac{-(t-t_s)}{R \cdot C}} \right) \quad (4.91)$$

A partir de las expresiones de  $v_{c1}(t)$  y  $v_{c2}(t)$  se obtiene  $v_c(t)$ :

$$v_c(t) = \begin{cases} k_1 \cdot R \cdot t + k_1 \cdot R^2 \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1 \right) \Rightarrow 0 < t < t_s \\ R \cdot I_{MAX} + k_1 \cdot R^2 \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - e^{\frac{-(t-t_s)}{R \cdot C}} \right) \Rightarrow t_s < t < t_c \\ V_{BUS} \Rightarrow t > t_c \end{cases} \quad (4.92)$$

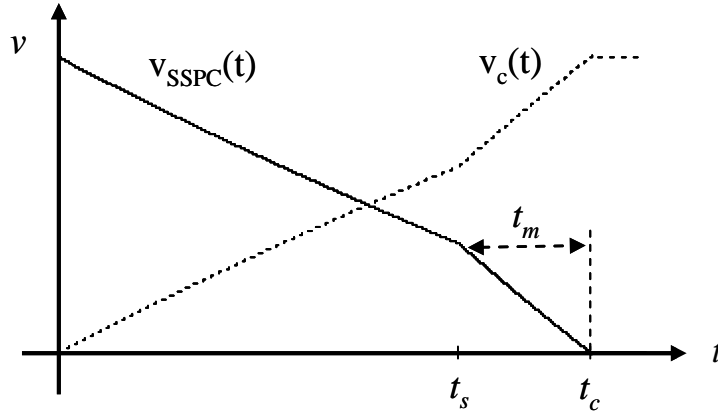
A partir de la tensión en el condensador se puede representar, en cada uno de los tramos, la corriente por la resistencia como:

$$i_R(t) = \frac{v_c(t)}{R} = \begin{cases} k_1 \cdot t + k_1 \cdot R \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1 \right) \Rightarrow 0 < t < t_s \\ I_{MAX} + k_1 \cdot R \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - e^{\frac{-(t-t_s)}{R \cdot C}} \right) \Rightarrow t_s < t < t_c \\ I_{NOM} \Rightarrow t > t_c \end{cases} \quad (4.93)$$

A partir de la tensión en el condensador se puede representar, en cada uno de los tramos, la tensión en el SSPC como:

$$v_{SSPC}(t) = \begin{cases} V_{BUS} - k_1 \cdot R \cdot t - k_1 \cdot R^2 \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1 \right) \Rightarrow 0 < t < t_s \\ V_{BUS} - R \cdot I_{MAX} - k_1 \cdot R^2 \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - e^{\frac{-(t-t_s)}{R \cdot C}} \right) \Rightarrow t_s < t < t_c \\ 0 \Rightarrow t > t_c \end{cases} \quad (4.94)$$

Así pues, se puede representar la tensión en bornes del SSPC y en la carga de acuerdo a la Figura 4.20. Se puede apreciar que la evolución de la tensión durante el primer tramo no es lineal al igual que con el método de conexión con derivada constante de la corriente.



**Figura 4.20: Tensión de la carga y del SSPC con control activo generalizado**

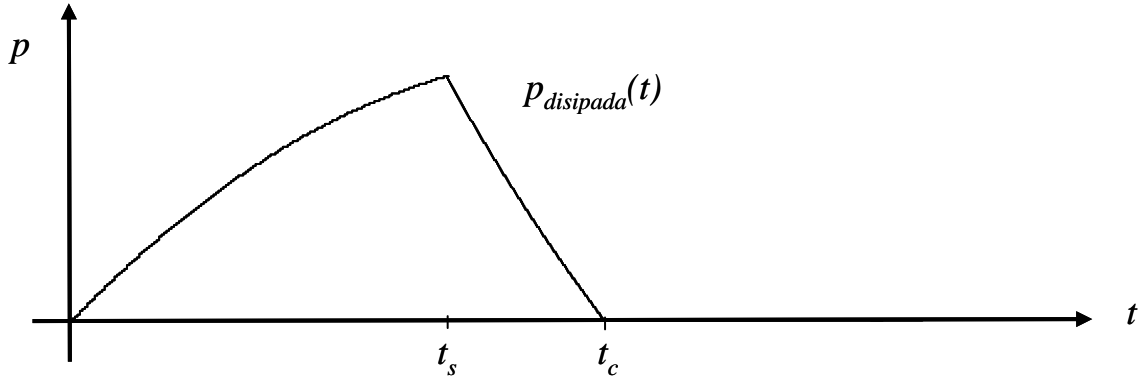
Durante la conexión teniendo en cuenta la forma de onda de la corriente, y a partir de las ecuaciones de corriente y tensión en el SSPC, se puede calcular la potencia disipada por el SSPC por la expresión:

$$p_{SSPC}(t) = \begin{cases} v_{SSPC}(t) \cdot i_{SSPC}(t) \Rightarrow 0 < t < t_s \\ v_{SSPC}(t) \cdot I_{MAX} \Rightarrow t_s < t < t_c \end{cases} \quad (4.95)$$

Donde la expresión completa de la potencia disipada por el SSPC durante el transitorio de conexión de la carga es:

$$p_{SSPC}(t) = \begin{cases} k_1 \cdot t \cdot \left[ V_{BUS} - k_1 \cdot R \cdot t - k_1 \cdot R^2 \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1 \right) \right] \Rightarrow 0 < t < t_s \\ I_{MAX} \cdot V_{BUS} - I_{MAX} \cdot \left( R \cdot I_{MAX} + k_1 \cdot R^2 \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - e^{\frac{-(t-t_s)}{R \cdot C}} \right) \right) \Rightarrow t_s < t < t_c \\ 0 \Rightarrow t > t_c \end{cases} \quad (4.96)$$

Una vez calculado el valor de la evolución de la potencia disipada con el tiempo, se puede representar de acuerdo con la Figura 4.21.



**Figura 4.21: Potencia disipada por el SSPC, con control activo generalizado**

En el caso de conexión con control activo generalizado la potencia media disipada viene determinada por la expresión:

$$P_{Media\_t_c} = \frac{1}{t_c} \cdot \int_0^{t_c} p_{SSPC}(t) \cdot dt \quad (4.97)$$

Sustituyendo el valor de  $p_{SSPC}(t)$  se obtiene la expresión de la integral completa:

$$P_{Media\_t_c} = \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{t_s + t_m} \cdot \int_0^{t_s} k_1 \cdot t \cdot \left[ V_{BUS} - k_1 \cdot R \cdot t - k_1 \cdot R^2 \cdot C \cdot (e^{\frac{-t}{RC}} - 1) \right] \cdot dt + \\ & \frac{1}{t_s + t_m} \cdot \int_{t_s}^{t_s + t_m} \left[ I_{MAX} \cdot V_{BUS} - I_{MAX} \cdot \left( R \cdot I_{MAX} + k_1 \cdot R^2 \cdot C \cdot (e^{\frac{-t}{RC}} - e^{\frac{-(t-t_s)}{RC}}) \right) \right] \cdot dt \end{aligned} \right. \quad (4.98)$$

Si se realiza la integral definida, se obtiene el valor de la potencia media. Dada la complejidad de la expresión es necesario utilizar hojas de cálculo para su resolución, ver Anexo A. A partir de la expresión de la potencia media disipada durante la conexión de la carga con control activo generalizado, es posible calcular el número de semiconductores necesarios, con la relación entre la potencia media y la potencia que es capaz de soportar el dispositivo, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$N_{MOSFET} = \frac{P_{Media\_t_c}}{P_{MAX\_SOA}} \quad (4.99)$$

#### 4.5.2 Valor máximo de la capacidad del condensador, que se puede conectar mediante control activo generalizado

A partir de las expresiones de corriente y tensión del SSPC y las ecuaciones que determinan los condensadores máximos que se pueden conectar, de acuerdo con los dos métodos de conexión activos con corriente constante y con derivada constante de la corriente, calculados previamente en el capítulo, es posible obtener el condensador máximo que se puede conectar con el SSPC para el caso de control activo generalizado.

##### 4.5.2.1 Cálculo del condensador método exacto

Para el cálculo del condensador se debe cumplir que al terminar la conexión de la carga, el valor final de la tensión en el condensador debe ser  $V_{BUS}$ , de lo que se obtiene la expresión:

$$V_{BUS} = v_c(t_c) \quad (4.100)$$

Sustituyendo la ecuación anterior en la expresión (4.92), se obtiene:

$$V_{BUS} = R \cdot I_{MAX} + k_1 \cdot R^2 \cdot C \cdot (e^{\frac{-t_c}{RC}} - e^{\frac{-(t_c - t_s)}{RC}}) \quad (4.101)$$

La resolución de esta ecuación requiere métodos iterativos si se desea despejar el valor de  $C$  y por tanto el uso de herramientas software específicas. Por otro lado, la utilización directa del balance de corrientes o cargas, usadas en las estrategias anteriores, también presentan un grado de complejidad elevado. Por lo cual, es necesario recurrir a metodologías de menor complejidad y que permitan calcular más fácilmente el condensador máximo.

#### 4.5.2.2 Método simplificado por descomposición

Considerando que la carga del condensador es un proceso acumulativo durante la conexión del SSPC [Serway92], y teniendo en cuenta que se conocen las expresiones que permiten calcular el condensador máximo, cuando se produce una conexión con corriente constante (4.40):

$$C_m = \frac{-t_m}{R \cdot \ln 1 - K_I} \quad (4.102)$$

donde  $K_I$  está definida por la expresión (4.41), y cuando la carga se conecta mediante derivada de corriente constante (4.83):

$$C_s = \frac{t_s}{R} \left( \frac{1}{2 \cdot K_I} - \frac{1}{3} \right) \quad (4.103)$$

se propone como aproximación para calcular la ecuación que define el condensador máximo a conectar, utilizando la estrategia de control activo generalizado, la suma algebraica de las expresiones que definen el condensador máximo en cada uno de los tramos (4.102) y (4.103):

$$C = C_s + C_m \quad (4.104)$$

Resolviendo la ecuación se calcula la capacidad del condensador máximo que es posible conectar combinando una rampa de corriente con derivada constante de la corriente en el instante inicial y una corriente constante en el instante posterior:

$$C = \frac{1}{R} \left[ t_s \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot K_I} - \frac{1}{3} \right) - \frac{t_m}{\ln 1 - K_I} \right] = \frac{1}{R} \left[ t_s \cdot \left( \frac{I_{MAX}}{2 \cdot I_{NOM}} - \frac{1}{3} \right) - \frac{t_m}{\ln \left( 1 - \frac{I_{NOM}}{I_{MAX}} \right)} \right] \quad (4.105)$$

Esta ecuación permite de una manera genérica calcular el condensador máximo que es posible conectar mediante un procedimiento generalizado de conexión, que combina el mantenimiento de la corriente y la derivada constante de la corriente.

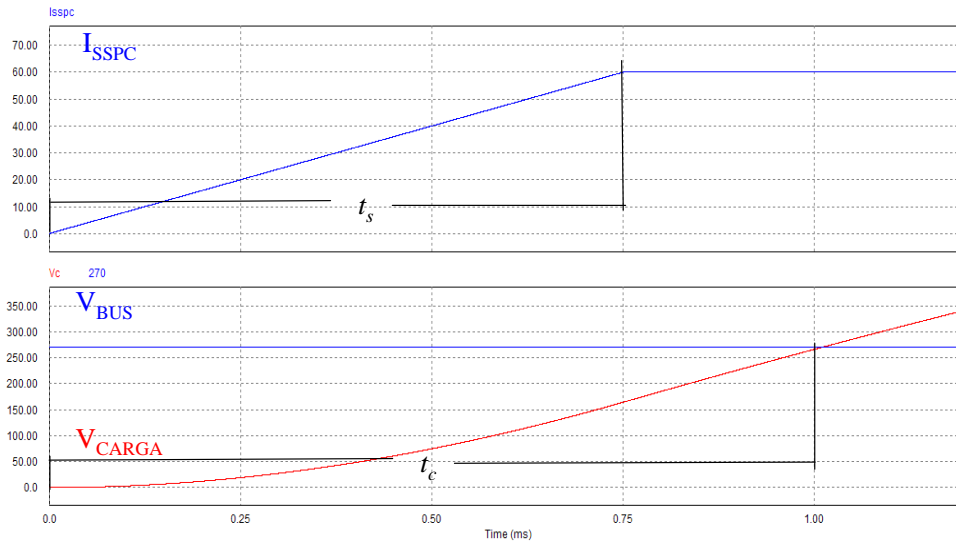
#### 4.5.3 Simulación de la conexión con control activo generalizado

Una vez ha sido calculada la ecuación que define el condensador máximo que se puede conectar cuando se utiliza el control activo generalizado, de acuerdo con las distintas

variables ( $I_{MAX}$ ,  $I_{NOM}$ ,  $t_s$ ,  $t_m$ , y  $R$ ), es posible realizar las diferentes simulaciones que permitan validar las expresiones, ver Figura 4.22.

En las simulaciones se han definido como parámetros de entrada los valores de la corriente nominal, corriente máxima, el valor de la resistencia de carga, los tiempos de subida y la capacidad de la carga.

Para la realización del ensayo se ha configurado una fuente de corriente programable en un circuito similar al de la Figura 4.13. Inicialmente la corriente evoluciona con derivada constante de la corriente hasta alcanzar un determinado valor de corriente por el SSPC, transcurrido un tiempo  $t_s$ . Una vez alcanzado este valor se mantiene la corriente constante durante un tiempo indefinido, de este modo se puede obtener el tiempo de conexión, para este caso  $t_c$ , comprendido entre el comienzo de la rampa con derivada constante de la corriente y el momento que la tensión en la carga alcanza la tensión de bus, ver Figura 4.22.



**Figura 4.22: Simulación de conexión de carga, mediante control activo generalizado**

A partir de los datos de corriente máxima, tensión de bus, corriente nominal, tiempo de subida, resistencia y capacidad de la carga se obtienen los datos del tiempo de conexión, para este caso  $t_c$ , mediante las hojas de cálculo del Anexo A, ver Tabla 4.8, Tabla 4.9 y Tabla 4.10. De este modo, el error se evalúa mediante la comparación del tiempo

obtenido en la simulación y el tiempo teórico calculado a partir del Anexo A, de acuerdo con la expresión:

$$Error = \frac{t_{m(teorico)} - t_{m(simulado)}}{t_{c(simulado)}} \cdot 100 \quad (4.106)$$

Se han realizado tres bloques de simulaciones dependiendo del porcentaje total aproximado sobre el tiempo de conexión, de los valores del tiempo de subida y el tiempo de mantenimiento de la corriente constante.

En la Tabla 4.8, se presentan los resultados de la simulación de la conexión mediante el control activo, cuando los tiempos de subida y mantenimiento son aproximadamente iguales.

Calculo teórico							Simulación	
V <sub>BUS</sub> [V]	I <sub>MAX</sub> [A]	I <sub>NOM</sub> [A]	t <sub>s</sub> [ms]	R [Ω]	C [μF]	t <sub>m</sub> [ms]	t <sub>m</sub> [ms]	Error [%]
270	<b>45</b>	10	0,5	27	109,18	0,5	0,494371	0,563%
270	<b>60</b>	10	0,5	27	150,95	0,5	0,495648	0,435%
270	<b>75</b>	10	0,5	27	192,68	0,5	0,496463	0,354%
270	60	<b>5</b>	0,5	54	158,883	0,5	0,497744	0,226%
270	60	<b>10</b>	0,5	27	150,95	0,5	0,495648	0,435%
270	60	<b>15</b>	0,5	18	142,85	0,5	0,493787	0,621%
270	60	10	<b>5</b>	27	1509,53	<b>5</b>	4,95652	0,435%
270	60	10	<b>0,5</b>	27	150,953	<b>0,5</b>	0,495648	0,435%
270	60	10	<b>0,05</b>	27	15,095	<b>0,05</b>	0,049565	0,435%

**Tabla 4.8: Simulación del control activo generalizado (t<sub>s</sub>=0,5 t<sub>c</sub>; t<sub>m</sub>= 0,5 t<sub>c</sub>)**

Para comparar los resultados, se han realizado diferentes simulaciones del transitorio de conexión modificando los valores de corrientes máximas, corriente nominal y tiempo de conexión total.

En la Tabla 4.9 se muestran los resultados de las simulaciones mediante el procedimiento generalizado, en los cuales los tiempos de subida corresponden aproximadamente a un 25% del tiempo de conexión y el tiempo de mantenimiento corresponde con un 75% del tiempo de conexión. Al igual que en las simulaciones anteriores se han comparado diferentes casos de simulación en los que se han modificado la corriente máxima, corriente nominal y tiempo de conexión total.

Calculo teórico							Simulación	
$V_{BUS}$ [V]	$I_{MAX}$ [A]	$I_{NOM}$ [A]	$t_s$ [ms]	$R$ [Ω]	$C$ [μF]	$t_m$ [ms]	$t_m$ [ms]	Error [%]
270	<b>45</b>	10	0,25	27	128,28	0,75	0,746592	0,341%
270	<b>60</b>	10	0,25	27	177,05	0,75	0,747092	0,291%
270	<b>75</b>	10	0,25	27	225,75	0,75	0,747992	0,201%
270	60	<b>5</b>	0,25	54	185,86	0,75	0,748525	0,148%
270	60	<b>10</b>	0,25	27	177,05	0,75	0,747092	0,291%
270	60	<b>15</b>	0,25	18	167,98	0,75	0,746587	0,341%
270	60	10	2,5	27	1770,5	7,5	7,47092	0,291%
270	60	10	0,25	27	177,05	0,75	0,747092	0,291%
270	60	10	0,025	27	17,705	0,075	0,074709	0,291%

**Tabla 4.9: Simulación del control activo generalizado ( $t_s=0,25 t_c$ ;  $t_m=0,75 t_c$ )**

En la Tabla 4.10 se incluyen los resultados de las diferentes conexiones mediante el control activo generalizado, en los cuales los tiempos de subida corresponden aproximadamente a un 75% del tiempo de conexión; y el tiempo de mantenimiento con



un 25% del tiempo de conexión. En este tercer bloque de simulaciones se han repetido los casos de simulación anteriores.

Calculo teórico							Simulación	
$V_{BUS}$ [V]	$I_{MAX}$ [A]	$I_{NOM}$ [A]	$t_s$ [ms]	$R$ [Ω]	$C$ [μF]	$t_m$ [ms]	$t_m$ [ms]	Error [%]
270	<b>45</b>	10	0,75	27	90,084	0,25	0,245865	0,414%
270	<b>60</b>	10	0,75	27	124,86	0,25	0,246591	0,341%
270	<b>75</b>	10	0,75	27	159,61	0,25	0,247089	0,291%
270	60	<b>5</b>	0,75	54	131,91	0,25	0,248038	0,196%
270	60	<b>10</b>	0,75	27	124,86	0,25	0,246591	0,341%
270	60	<b>15</b>	0,75	18	117,72	0,25	0,245535	0,446%
270	60	10	<b>7,5</b>	27	1248,6	<b>2,5</b>	2,4659	0,341%
270	60	10	<b>0,75</b>	27	124,86	<b>0,25</b>	0,246591	0,341%
270	60	10	<b>0,075</b>	27	12,486	<b>0,025</b>	0,0246591	0,341%

**Tabla 4.10: Simulación del control activo generalizado ( $t_s=0,75 t_c$ ;  $t_m=0,25 t_c$ )**

Es importante señalar que al igual que ocurría con las conexiones por corriente constante y con derivada constante de la corriente, el error cometido siempre está por debajo del 0,5%.

A partir de los resultados obtenidos de la simulación, se puede concluir que para las conexiones en las que el tiempo de subida es menor que el tiempo de mantenimiento, se pueden conectar condensadores de valores mayores, reduciendo la potencia disipada durante los instantes iniciales de la conexión.

#### **4.5.4 Ventajas e inconvenientes del control activo generalizado**

El procedimiento por control activo generalizado es el más versátil de los tres métodos activos propuestos, ya que permite la conexión de condensadores con gran capacidad en tiempos de conexión pequeños, con menores potencias máximas disipadas en los instantes iniciales de la conexión, si se compara con el método de control activo por corriente constante.

Por otro lado, se pueden configurar los tiempos de conexión de las cargas, y no requieren de modificaciones hardware del dispositivo para implementar otros tiempos de conexión ó variar los niveles de corriente, al igual que los otros métodos de conexión basados en circuitos activos. El inconveniente principal, que está presente en los dos métodos de control activo anteriores propuestos, es el circuito adicional de control requerido, para realizar el control de la corriente.

En la Tabla 4.11 se muestran las ecuaciones básicas de funcionamiento del SSPC con control activo generalizado, así como las ecuaciones que permiten calcular las capacidades máximas que se pueden conectar.

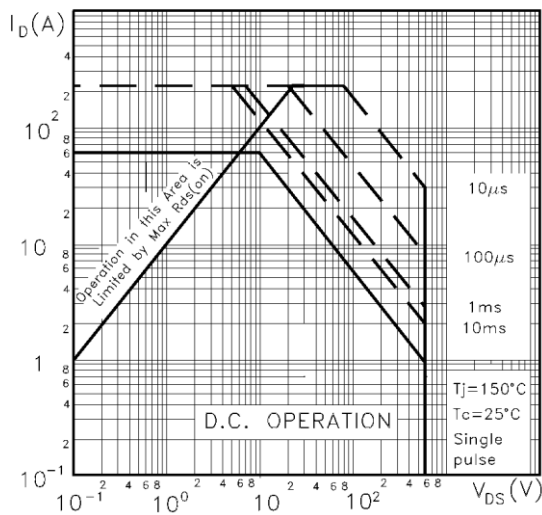
SSPC	
$i_{SSPC}(t) = \begin{cases} \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot t \Rightarrow 0 < t < t_s \\ I_{MAX} \Rightarrow t_s < t < t_c \\ I_{NOM} \Rightarrow t > t_c \end{cases}$	
$v_{SSPC}(t) = \begin{cases} V_{BUS} - \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R \cdot t - \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R^2 \cdot C \cdot (e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1) \Rightarrow 0 < t < t_s \\ V_{BUS} - R \cdot I_{MAX} - \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R^2 \cdot C \cdot (e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - e^{\frac{-(t-t_s)}{R \cdot C}}) \Rightarrow t_s < t < t_c \\ 0 \Rightarrow t > t_c \end{cases}$	
$p_{SSPC}(t) = \begin{cases} \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot t \cdot \left[ V_{BUS} - \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R \cdot t - \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R^2 \cdot C \cdot (e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1) \right] \Rightarrow 0 < t < t_s \\ I_{MAX} \cdot V_{BUS} - I_{MAX} \cdot \left( R \cdot I_{MAX} + \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R^2 \cdot C \cdot (e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - e^{\frac{-(t-t_s)}{R \cdot C}}) \right) \Rightarrow t_s < t < t_c \\ 0 \Rightarrow t > t_c \end{cases}$	
$N_{MOSFET} = \frac{P_{Media-t_c}}{P_{MAX_{SOA}}}$	
Resistencia	Condensador
$i_R(t) = \frac{v_C(t)}{R} = \begin{cases} \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot t + \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R \cdot C \cdot (e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1) \Rightarrow 0 < t < t_s \\ I_{MAX} + \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R \cdot C \cdot (e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - e^{\frac{-(t-t_s)}{R \cdot C}}) \Rightarrow t_s < t < t_c \\ I_{NOM} \Rightarrow t > t_c \end{cases}$	$i_C(t) = \begin{cases} \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R \cdot C \cdot (1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}}) \Rightarrow 0 < t < t_s \\ \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R \cdot C \cdot (e^{\frac{-(t-t_s)}{R \cdot C}} - e^{\frac{-t}{R \cdot C}}) \Rightarrow t_s < t < t_c \\ 0 \Rightarrow t > t_c \end{cases}$
$v_C(t) = \begin{cases} \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R \cdot t + \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R^2 \cdot C \cdot (e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1) \Rightarrow 0 < t < t_s \\ R \cdot I_{MAX} + \frac{I_{MAX}}{t_s} \cdot R^2 \cdot C \cdot (e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - e^{\frac{-(t-t_s)}{R \cdot C}}) \Rightarrow t_s < t < t_c \\ V_{BUS} \Rightarrow t > t_c \end{cases}$	
Capacidad Máxima	
$C = \frac{1}{R} \left[ t_s \cdot \left( \frac{I_{MAX}}{2 \cdot I_{NOM}} - \frac{1}{3} \right) - \frac{t_m}{\ln \left( 1 - \frac{I_{NOM}}{I_{MAX}} \right)} \right]$	

Tabla 4.11: Ecuaciones de funcionamiento del SSPC con control activo generalizado

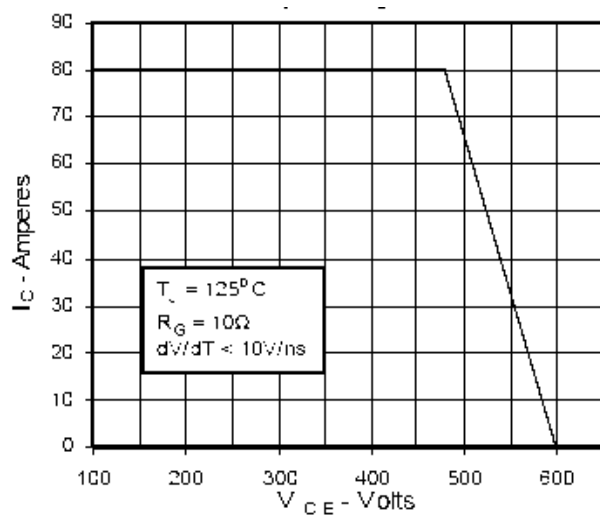
## 4.6 Conexión de cargas con control activo óptimo de la trayectoria de la corriente

Una vez presentados y comparados los diferentes métodos activos de conexión de cargas altamente capacitivas, en este apartado se propone un método de conexión óptimo del SSPC, que cumple con los límites de la zona de operación segura ó SOA (*Safety Operation Area*).

Antes de proceder al detalle de operación del control óptimo se recordará los principales tramos del SOA de un MOSFET y un IGBT. Se tomará como referencia dos componentes comerciales, el MOSFET con la referencia STY60NM50 [STY60NM], Figura 4.23 y el IGBT con la referencia 50N60B2 [50N60B2], Figura 4.24.



**Figura 4.23: Área de Operación Segura (SOA) del MOSFET, modelo STY60NM50**



**Figura 4.24: Área de Operación Segura (SOA), del IGBT modelo 50N60B2**

La SOA del MOSFET se puede dividir en tres tramos en los cuales va a ser posible controlar la corriente, ver Figura 4.23:

- Durante el primer tramo, **instante inicial de la conexión**, con tensiones máximas entre el drenador y el surtidor de 600 V, la corriente entre el drenador y el surtidor puede alcanzar valores máximos de 30 A si la conmutación dura 10

microsegundos, 8 A si la conmutación dura 100 microsegundos, 3 A si la conmutación dura 1 milisegundos, 2 A si la conmutación dura 10 milisegundos y 1 A en operación en continua.

- Durante el **instante intermedio de la conexión** cuando la tensión empieza a disminuir, la corriente multiplicada por la tensión que soporta el MOSFET no puede superar un valor de potencia constante, el cual depende de la duración de la transición y es igual a 18.000 W si la conmutación dura 10 microsegundos, 4.800 W si la conmutación dura 100 microsegundos, 1.800 W si la conmutación dura 1 milisegundos, 1.200 W si la conmutación dura 10 milisegundos y 600 W en operación en continua.
- El tercer tramo cubre el rango de tensiones producidas durante el **instante final de la conmutación**, en esta zona las corrientes permitidas que circulan desde el drenador al surtidor aumentan hasta un máximo de 200 A. La entrada en esta tercera zona, al igual que el primer tramo, va a depender del tiempo que dure la conmutación de la carga, debiendo estar por debajo de 80 V si la conmutación dura 10 microsegundos, 20 V si la conmutación dura 100 microsegundos, 7 V si la conmutación dura 1 milisegundos, 5 V si la conmutación dura 10 milisegundos y 10 V en operación en continua.

De este modo, el control óptimo de la corriente por el MOSFET que permita conectar el condensador de mayor valor posible mediante un SSPC, estará condicionado por la curva del SOA. No obstante, es importante señalar que esta curva puede verse reducida por la frecuencia en el número de conmutaciones del SSPC [Shue10] y por otros factores externos como la temperatura del componente.

Por otro lado, la SOA del IGBT se puede dividir en un único tramo, teniendo en cuenta los niveles de tensión de funcionamiento, 270 V, dentro del cual va a ser posible controlar la corriente, ver Figura 4.24, y corresponde con el tercer tramo del MOSFET:

- En esta zona las corrientes permitidas que circulan desde el colector al emisor pueden alcanzar un valor máximo de 80 A durante el transitorio de conexión.

Así pues, mediante la combinación de los procedimientos simples de conexión por corriente constante y por derivada de corriente constante es posible optimizar la conexión de una carga capacitiva, reduciendo el tiempo de conexión y aprovechando al máximo los semiconductores de acuerdo con la curva de la SOA.

Para los próximos apartados los cálculos se centrarán en el MOSFET, ya que la trayectoria óptima del IGBT, para los rangos de tensiones estudiados, corresponde con el control activo con corriente constante.

#### 4.6.1 Funcionamiento del SSPC con control activo de la trayectoria óptima de la corriente

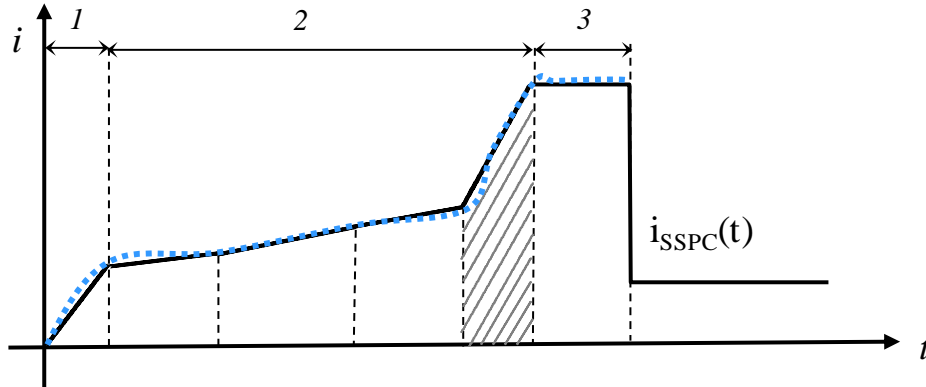
Si se considera el área de operación segura definida en el apartado anterior, se obtiene el límite máximo de energía que el MOSFET puede manejar durante una conexión, dependiendo de la duración del transitorio de conexión, a partir del primer y segundo tramo de la curva del SOA, ver Tabla 4.12. Mediante el procedimiento de control activo generalizado es complicado ajustar la corriente a los rangos de potencia y tiempos de conexión, que permita un aprovechamiento óptimo del semiconductor.

Tiempo de la conexión [ms]	Potencia de pico [W]	Energía máxima [J]
0,01	18000	0,18
0,1	4800	0,48
1	1800	1,8
10	1200	12

**Tabla 4.12: Características de operación segura del MOSFET, modelo STY60NM50**

Como se puede apreciar en la Tabla 4.12 para tiempos menores, la potencia de pico disipable es mayor pero la energía máxima permitida es menor. Para optimizar y ajustar a los requisitos de potencia de pico, energía y tiempos de conexión, es necesario recurrir a un método de conexión más complejo que los tres procedimientos descritos en los

apartados anteriores. De este modo, en la Figura 4.25, se puede apreciar un procedimiento de conexión que permite ajustar la corriente del SSPC en función de la SOA. En la representación de la Figura 4.25 se muestra con trazo discontinuo la evolución real de la corriente y con trazo continuo la aproximación por tramos.



**Figura 4.25: Conexión mediante el control activo óptimo de la trayectoria de la corriente (a trazo discontinuo), aproximación por tramos (a trazo continuo)**

Durante la conexión mediante control activo óptimo de la trayectoria de corriente se pueden identificar tres tipos de tramos bien diferenciados, ver Figura 4.25:

- Tramos a derivada de corriente constante, con valor inicial cero, tramo 1 de la SOA del MOSFET.
- Tramos a derivada de corriente constante con valor inicial distinto de cero, tramo 2 de la SOA del MOSFET.
- Tramos a corriente constante, tramo 3 de la SOA del MOSFET.

Es importante señalar que el primer tramo de conexión, está definido por el método de conexión por derivada constante de la corriente, que es el método que menos disipación térmica del semiconductor impone en el instante inicial.

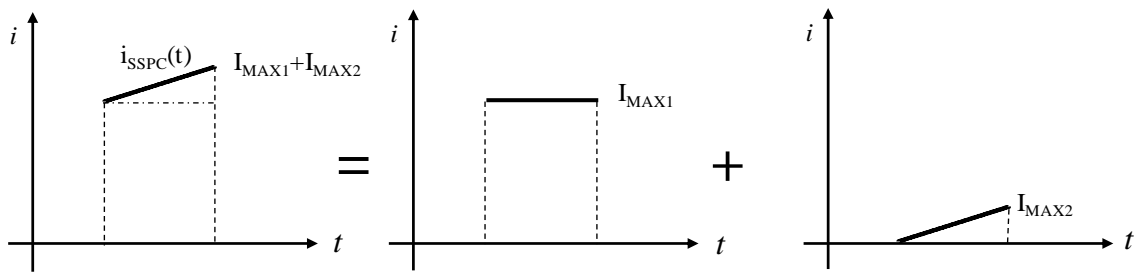
Por otro lado, el tramo final previo a alcanzar la corriente nominal, corresponde con la conexión mediante el mantenimiento de la corriente constante.

En cuanto a los tramos con derivada constante de la corriente con valor inicial distinto de cero, gráficamente se representa por trapecios y se pueden descomponer como la suma de los dos anteriores, ver Figura 4.26, como se detalla en el epígrafe siguiente.

#### 4.6.2 Valor máximo de la capacidad del condensador, que se puede conectar con control activo por trayectoria óptima de la corriente

Teniendo en cuenta que en el método generalizado de conexión, epígrafe 4.5, el cálculo del condensador máximo se realizó a partir de las expresiones de los procedimientos simples de conexión por corriente constante y por derivada constante de la corriente, debido a la complejidad de las ecuaciones. En este caso se propone utilizar una sistemática similar, ya que, para los tramos con derivada constante de la corriente con valor inicial distinto de cero, se puede comprobar gráficamente que la corriente por el SSPC se puede descomponer en dos tramos, ver Figura 4.26.

De las áreas resultantes de estos dos tramos, la primera corresponde con el procedimiento de conexión por corriente constante, y la segunda área corresponde con el procedimiento de conexión con derivada constante de la corriente con corriente inicial cero. Donde  $I_{MAX1}$  es el nivel inicial de corriente del tramo con derivada constante de la corriente con valor inicial distinto de cero; e  $I_{MAX1}+I_{MAX2}$  es el valor final del tramo. Por lo tanto  $I_{MAX2}$  corresponde a la diferencia entre el valor final e inicial de dicho tramo.



**Figura 4.26: Descomposición del tramo con derivada constante de la corriente y corriente inicial distinta de cero**

Así pues, para el área resultante de la descomposición que corresponde con la conexión a corriente constante, y de acuerdo con las ecuaciones presentada en el epígrafe 4.3.2, se puede conectar un condensador máximo, cuyo valor viene definido por:



$$C_{r1} = \frac{-t_r}{R_1 \cdot \ln|1 - K_{I1}|} \quad (4.107)$$

Donde  $t_r$  es el tiempo que dura la rampa, y  $R_1$  y  $K_{I1}$  se definirán a continuación.

El valor de  $K_{I1}$  quedará definido por la expresión:

$$K_{I1} = \frac{I_{NOM}}{I_{MAX1}} \quad (4.108)$$

Por otro lado, la corriente nominal y la tensión de bus definen el valor de la resistencia equivalente  $R_1$ , para esta área, como:

$$R_1 = \frac{V_{BUS}}{I_{NOM}} \quad (4.109)$$

Además, la segunda área resultante de la descomposición corresponde con la conexión con derivada constante de la corriente con corriente inicial cero. De acuerdo con las ecuaciones descritas en el epígrafe 4.4.2, es posible conectar un condensador máximo cuyo valor se puede calcular como:

$$C_{r2} = \frac{t_r}{R_2} \cdot \left| \frac{1}{2 \cdot K_{I2}} - \frac{1}{3} \right| \quad (4.110)$$

Donde  $t_r$  es el tiempo que dura la rampa y  $K_{I2}$  y  $R_2$  se definirá a continuación.

El valor de  $K_{I2}$  se puede expresar como:

$$K_{I2} = \frac{I_{NOM}}{I_{MAX2}} \quad (4.111)$$

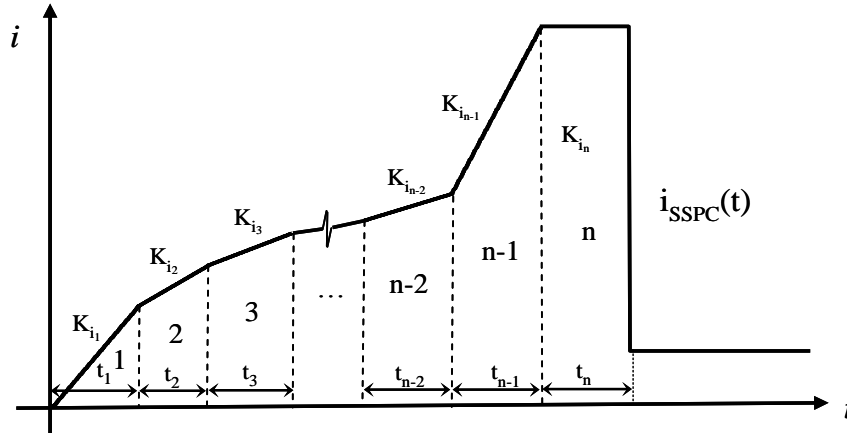
Así pues, mediante la relación entre la corriente nominal y la tensión de bus se puede calcular el valor de la resistencia equivalente  $R_2$  para esta área, resultando como:

$$R_2 = \frac{V_{BUS}}{I_{NOM}} \quad (4.112)$$

Teniendo en cuenta el valor de las corrientes nominales en cada una de las áreas, se cumple que:

$$R_1 = R_2 = R \quad (4.113)$$

Considerando la conexión con un control óptimo de la trayectoria de la corriente representada en la Figura 4.27, es posible dividirla en intervalos, donde cada uno presenta una  $K_{i1}$  y  $K_{i2}$ , característica que es independiente de la anterior, indicada genéricamente en la Figura 4.27 como  $K_i$ .



**Figura 4.27: Conexión mediante el control activo óptimo de la trayectoria de la corriente**

De este modo considerando cada una de las zonas de la Figura 4.27, se puede expresar la ecuación general que define el condensador máximo que se puede conectar mediante el procedimiento de control óptimo de la trayectoria de la corriente como:

$$C_T = \sum_{j=1}^n C_j = \frac{t_1}{R} \cdot \left| \frac{I_{MAX1}}{2 \cdot I_{NOM}} - \frac{1}{3} \right| + \sum_{j=2}^{n-1} \left( \frac{t_j}{R} \cdot \left| \frac{I_{MAX2j}}{2 \cdot I_{NOM}} - \frac{1}{3} \right| + \frac{-t_j}{R \cdot \ln \left| 1 - \frac{I_{NOM}}{I_{MAX1j}} \right|} \right) + \frac{-t_n}{R \cdot \ln \left| 1 - \frac{I_{NOM}}{I_{MAXn}} \right|} \quad (4.114)$$

No obstante, esta ecuación (4.114) introduce un error de cálculo, ver Tabla 4.13, debido a que en la descomposición del tramo con derivada constante de la corriente y corriente inicial distinta de cero, la carga entregada a la resistencia se tiene en cuenta dos veces, ya que se ha considerado en esta aproximación la misma corriente nominal para ambas áreas.

Sin embargo, realmente lo que ocurre es que los tramos comparten el valor de la carga entregada a la resistencia. Para solucionar este problema se realiza un promediado aproximado de las corrientes, proporcional al valor de la corriente máxima de cada una de las áreas, de forma que se reduzca el error introducido.

De este modo, para el área resultante de la descomposición correspondiente con la conexión con corriente constante y definida por la ecuación:

$$C_{r1} = \frac{-t_r}{R_1 \cdot \ln|1 - K_{I_1}|} \quad (4.115)$$

Donde  $t_r$  sigue siendo el tiempo que dura la rampa, y el valor de  $R_1$  y  $K_{I_1}$  se definirán a continuación. Si se fija el valor de corriente nominal equivalente  $I_{NOM1}$  como:

$$I_{NOM1} = \frac{I_{MAX1}}{I_{MAX1} + I_{MAX2}} \cdot I_{NOM} \quad (4.116)$$

El valor de  $K_{I_1}$  quedará definido por la expresión:

$$K_{I_1} = \frac{I_{NOM1}}{I_{MAX1}} \quad (4.117)$$

A partir de la relación entre la corriente nominal equivalente y la tensión de bus se define el valor de la resistencia equivalente  $R_1$ , para esta área, como:

$$R_1 = \frac{V_{BUS}}{I_{NOM1}} \quad (4.118)$$

Por otro lado, para la segunda área resultante de la descomposición corresponde con la conexión por derivada de corriente constante con corriente inicial cero, definida por la ecuación:

$$C_{r2} = \frac{t_r}{R_2} \cdot \left| \frac{1}{2 \cdot K_{I_2}} - \frac{1}{3} \right| \quad (4.119)$$

Donde  $t_r$  es el tiempo que dura la rampa, y  $K_{I_2}$  y  $R_2$  se definirán a continuación. Si se fija el valor de corriente nominal equivalente  $I_{NOM2}$  como:

$$I_{NOM2} = \frac{I_{MAX2}}{I_{MAX1} + I_{MAX2}} \cdot I_{NOM} \quad (4.120)$$

el valor de  $K_{I_2}$  se puede expresar como:

$$K_{I_2} = \frac{I_{NOM2}}{I_{MAX2}} \quad (4.121)$$

Así pues, mediante la relación entre la corriente nominal y la tensión de bus se calcula el valor de la resistencia equivalente  $R_2$ , para esta área, como:

$$R_2 = \frac{V_{BUS}}{I_{NOM2}} \quad (4.122)$$

Teniendo en cuenta el valor de las corrientes nominales en cada una de las áreas, se cumple que:

$$I_{NOM} = I_{NOM1} + I_{NOM2} \quad (4.123)$$

De lo que se deduce que en cada uno de las áreas en las que se descompone la conexión por derivada de corriente constante con corriente inicial distinta de cero las  $K_i$  son iguales (4.116) (4.117) (4.120) (4.121):

$$K_{I_1} = K_{I_2} = K_i = \frac{I_{NOM}}{I_{MAX1} + I_{MAX2}} \quad (4.124)$$

Así pues, considerando cada una de las zonas de la Figura 4.27, se puede expresar la ecuación general que define el condensador máximo que se puede conectar mediante el procedimiento de control óptimo de la trayectoria de la corriente, con un error menor que la expresión (4.113), de acuerdo con la ecuación:

$$C_T = \sum_{j=1}^n C_j = \frac{t_1}{R} \cdot \left| \frac{1}{2 \cdot K_{i_1}} - \frac{1}{3} \right| + \sum_{j=2}^{n-1} \left( \frac{t_j}{R_{1j}} \cdot \left| \frac{1}{2 \cdot K_{i_j}} - \frac{1}{3} \right| + \frac{-t_j}{R_{1j} \cdot \ln|1 - K_{i_j}|} \right) + \frac{-t_n}{R \cdot \ln|1 - K_{i_n}|} \quad (4.125)$$

Donde  $K_i$  es la relación entre la corriente nominal y la máxima de cada uno de los tramos que tienen una duración  $t_j$ , de acuerdo con la expresión:

$$K_{i_j} = \frac{I_{NOM}}{I_{MAX1j} + I_{MAX2j}} = \frac{I_{NOM}}{I_{MAXj}} \quad (4.126)$$

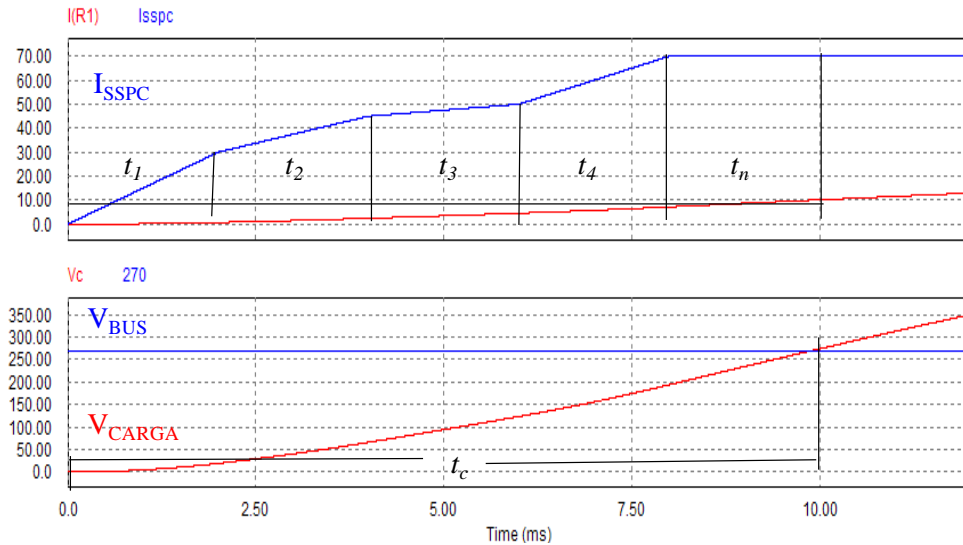
$R$  es la parte resistiva total de la carga que se conecta;  $R_{1j}$  y  $R_{2j}$  son proporcionales a la corriente que circula por la parte equivalente resistiva de cada uno de las zonas, en el área correspondiente con derivada constante de la corriente con corriente inicial distinta de cero:

$$R_{1_j} = \frac{V_{BUS}}{I_{NOM1_j}} \quad y \quad R_{2_j} = \frac{V_{BUS}}{I_{NOM2_j}} \quad (4.127)$$

#### 4.6.3 Simulación de la conexión con control activo óptimo de la trayectoria de la corriente

Una vez han sido calculadas las ecuaciones que definen el condensador máximo que se puede conectar de acuerdo con las distintas variables ( $I_{NOM}$ ,  $I_{MAX}$  y  $R$ ) y los distintos intervalos de conexión ( $t_1$ ,  $t_2, \dots, t_n$ ), es posible realizar las diferentes simulaciones que permitan validar las expresiones. Para la realización del ensayo se ha configurado una fuente de corriente programable con diferentes rampas de corriente en un circuito similar al de la Figura 4.13.

Inicialmente se programa una corriente con derivada constante de la corriente y corriente inicial cero hasta alcanzar un determinado valor de corriente por el SSPC, los siguientes tramos programados tienen derivada de corriente constante con corriente inicial igual a la máxima del tramo anterior, pero con un valor de la derivada de corriente distinta. Una vez alcanzado el valor máximo de corriente durante la conexión, se mantiene la corriente máxima indefinidamente, ver Figura 4.28.



**Figura 4.28: Simulación de conexión de carga, con control activo óptimo de la trayectoria de la corriente**

De este modo se puede obtener el tiempo de conexión, para este caso  $t_c$ , justo en el momento que la tensión en la carga alcanza la tensión de bus, ver Figura 4.28.

A partir de los datos de corrientes máximas, tensión de bus, corriente nominal, tiempos de subida, resistencia y capacidad de la carga se obtienen los datos del tiempo de conexión, para este caso  $t_c$ , ver Tabla 4.13.

De este modo, el error se evalúa mediante la comparación del tiempo obtenido en la simulación y el tiempo calculado mediante las expresiones definidas en el párrafo anterior, de acuerdo con la expresión:

$$Error = \frac{t_{c(teorico)} - t_{c(simulado)}}{t_{c(simulado)}} \cdot 100 \quad (4.128)$$

Calculo teórico y dato de simulación (Ecuación (4.114))												
$V_{BUS}$ [V]	$I_{MAX}$ [A]	$I_{NOM}$ [A]	$t_1$ [ms]/ $I_{MAX1}$ [A]	$t_2$ [ms]/ $I_{MAX2}$ [A]	$t_3$ ms]/ $I_{MAX}$ [A]	$t_4$ [ms]/ $I_{MAX}$ [A]	$t_n$ [ms]	$C$ [mF]	$R$ [Ω]	$t_{c\_teo}$ [ms]	$t_{c\_sim}$ [ms]	Error [%]
270	<b>45</b>	10	3,33/ 30	3,33/ 45	-	-	3,33	0,990	27	9,99	9,55	4,3%
270	<b>50</b>	10	2,5/ 30	2,5/ 45	2,5/ 50	-	2,5	1,166	27	10	9,59	4,0%
270	<b>70</b>	10	2/ 30	2/ 45	2/ 50	2/ 70	2	1,462	27	10	9,60	3,9%
Calculo teórico y dato de simulación (Ecuación (4.125))												
$V_{BUS}$ [V]	$I_{MAX}$ [A]	$I_{NOM}$ [A]	$t_1$ [ms]/ $I_{MAX1}$ [A]	$t_2$ [ms]/ $I_{MAX2}$ [A]	$t_3$ ms]/ $I_{MAX}$ [A]	$t_4$ [ms]/ $I_{MAX}$ [A]	$t_n$ [ms]	$C$ [mF]	$R$ [Ω]	$t_{c\_teo}$ [ms]	$t_{c\_sim}$ [ms]	Error [%]
270	<b>45</b>	10	3,33/ 30	3,33/ 45	-	-	3,33	1,040	27	9,99	9,89	0,9%
270	<b>50</b>	10	2,5/ 30	2,5/ 45	2,5/ 50	-	2,5	1,221	27	10	9,90	0,9%
270	<b>70</b>	10	2/ 30	2/ 45	2/ 50	2/ 70	2	1,538	27	10	9,90	0,9%

**Tabla 4.13: Simulación del control activo con control óptimo de la corriente**

En la Tabla 4.13, se presentan los resultados obtenidos en la simulación, que permiten validar las expresiones calculadas a lo largo del apartado (4.114) y (4.125). Para ello se

plantean tres casos, en los cuales se utiliza una simplificación utilizando 3, 4 y 5 tramos de conexión.

En todas las simulaciones el tiempo de conexión se ha mantenido en un milisegundo como valor de referencia. Tras el análisis de los resultados obtenidos en la simulación, se puede concluir que para un mismo tiempo de conexión es posible aumentar el valor de la capacidad de la carga que se puede conectar, mediante la optimización del control de la trayectoria de la corriente.

Como se puede comprobar el error cometido utilizando la ecuación (4.125) es menor que si se utiliza la ecuación (4.114), y en todo caso está por debajo del 1%, siendo el caso más desfavorable la conexión que se realiza mediante cuatro pendientes diferentes de corriente, es decir cuando se divide la evolución continua de la corriente por el SSPC en cinco tramos de conexión, para realizar el análisis del condensador máximo que es posible cargar en un determinado tiempo de conexión.

#### **4.6.4 Ventajas e inconvenientes del control activo óptimo de la trayectoria de la corriente**

El método de control activo óptimo de la trayectoria de la corriente mejora la conexión de la carga en comparación con los tres métodos activos propuestos, ya que permite la conexión de condensadores elevados en tiempos de conexión pequeños, optimizando el aprovechamiento del semiconductor interno en el SSPC durante el transitorio. De este modo, la principal ventaja es que optimiza aún más la conexión de las cargas capacitivas y permite reducir el número de semiconductores necesarios para el diseño de los SSPC.

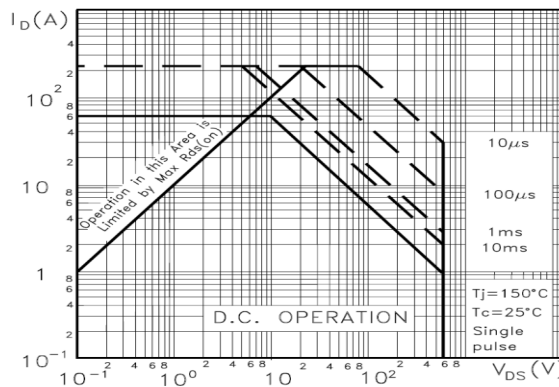
Por otro lado, al igual que en el resto de métodos activos se pueden configurar los tiempos de conexión de las cargas, y no requieren de modificaciones hardware del dispositivo para implementar otros tiempos de conexión.

La principal desventaja son la necesidad de circuitos de control activo, además, este método requiere de un circuito de monitorización de la tensión de la carga, con lo que complica algo más la implementación de este tipo de control.

## 4.7 Comparativa de los métodos de control activo

En este apartado se comparan las cuatro metodologías de conexionado por control activo propuestas, con corriente constante, mediante derivada constante de la corriente, método generalizado y por control óptimo de la trayectoria de la corriente. El control pasivo se considera a efectos de la comparativa incluido en el caso del control activo mediante derivada constante de la corriente.

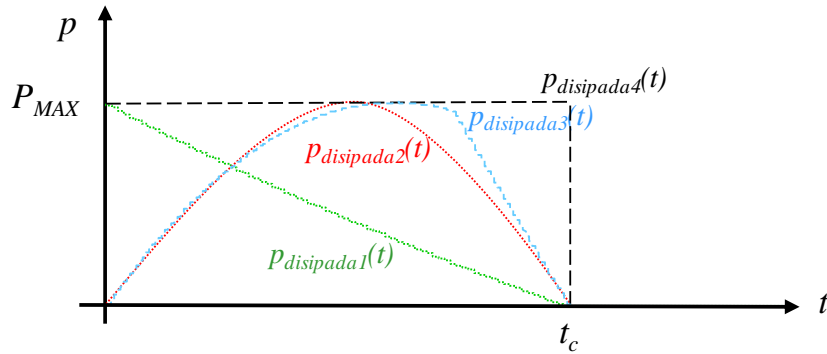
De acuerdo con las distintas estrategias de conexión se van a comparar, mediante las herramientas presentadas en el Anexo A, las potencias disipadas por el SSPC, durante el transitorio de conexión con igual corriente nominal, diferentes capacidades de conexión y con los valores máximos limitados por la SOA para un tiempo de conexión de 10 ms. En este caso, la curva de operación segura del semiconductor ó SOA (*Safety Operation Area*), se ha obtenido a partir de los datos de potencias máximas permitas incluidas en las hojas de características del fabricante del MOSFET, modelo STY60NM50, ver Figura 4.29.



**Figura 4.29: Área de Operación Segura (SOA) del MOSFET, modelo STY60NM50**

Considerando las potencias disipadas para cada una de las estrategias de control activo, ver Figura 4.30, el aprovechamiento máximo del semiconductor se produce en primer lugar para el control activo mediante control óptimo de la trayectoria de la corriente. El menor aprovechamiento del SSPC durante la conmutación de una carga muy capacitiva se produce para el control activo por corriente constante.





**Figura 4.30: Comparativa de la potencia disipada por el SSPC, para el mismo tiempo de conexión y con diferentes capacidades: mediante control activo con corriente constante (1), control activo con derivada constante de la corriente (2), control activo generalizado (3) y control activo con control óptimo de la trayectoria de la corriente (4)**

De este modo, si se calcula los valores de C y R mediante las herramientas presentadas en el Anexo A, ó se simula para el caso de control activo con control óptimo de la trayectoria de la corriente, se obtienen los valores de potencias medias disipadas en el SSPC y el factor de aprovechamiento, ver Tabla 4.14.

Método	$V_{BUS}$ [V]	$I_{MAX}$ [A]	$I_{NOM}$ [A]	$t_c$ [ms]	C [μF]	$P_{Media}$ [W]	$P_{Max}$ [W]	$P_{Media}/P_{Max}$ [%]
Control activo con corriente constante	270	4,4	1	10	143,6	568	1200	47,33%
Control activo con derivada constante de la corriente	270	11,7	1	10	204,3	781	1200	65,08%
Control activo generalizado (75% $t_s$ ; 25% $t_m$ )	270	10,95	1	10	239,5	794	1200	66,17%
Control activo con control óptimo de la trayectoria de la corriente	270	<b>200</b>	1	10	<b>316,4</b>	<b>1200</b>	1200	<b>100%</b>

**Tabla 4.14: Comparativa de los procedimientos de conexión con control activo e igual tiempo de conexión, limitado por la SOA**

Como se puede observar en la Tabla 4.14 para el control activo con control óptimo de la trayectoria de la corriente, el aprovechamiento del MOSFET se hace máximo durante el

transitorio de conexión, lo que permite conectar condensadores mayores en tiempos de conexión menores y con tamaños o números de semiconductores menores.

Teniendo en cuenta las diferentes estrategias de conexión de cargas muy capacitivas con control activo que se ha presentado en los apartados anteriores, se pueden resumir en la Tabla 4.15 las ecuaciones que definen el valor de los condensadores que se pueden conectar. Estas ecuaciones dependen de los parámetros de corriente nominal, corriente máxima, valor resistivo de la carga y tiempo de conexión.

Calculo del valor de C máximo en función de la estrategia de control activo	
$C_m = \frac{-t_m}{R \cdot \ln \left( 1 - \frac{I_{NOM}}{I_{MAX}} \right)}$ <p><i>Control activo con corriente constante</i></p>	$C = \frac{1}{R} \left[ t_s \cdot \left( \frac{I_{MAX}}{2 \cdot I_{NOM}} - \frac{1}{3} \right) - \frac{t_m}{\ln \left( 1 - \frac{I_{NOM}}{I_{MAX}} \right)} \right]$ <p><i>Control activo generalizado</i></p>
$C_s = \frac{t_s}{R} \left( \frac{I_{MAX}}{2 \cdot I_{NOM}} - \frac{1}{3} \right)$ <p><i>Control activo con derivada constante de la corriente</i></p>	
$C_T = \sum_{j=1}^n C_j = \frac{t_1}{R} \cdot \left  \frac{I_{MAX_1}}{2 \cdot I_{NOM}} - \frac{1}{3} \right  + \sum_{j=2}^{n-1} \left( \frac{t_j}{R_{2_j}} \cdot \left  \frac{I_{MAX_j}}{2 \cdot I_{NOM}} - \frac{1}{3} \right  + \frac{-t_j}{R_{1_j}} \frac{1}{\ln \left  1 - \frac{I_{NOM}}{I_{MAX_j}} \right } \right) + \frac{-t_n}{R} \frac{1}{\ln \left  1 - \frac{I_{NOM}}{I_{MAX_n}} \right }$ <p><i>Control activo de la trayectoria óptima de corriente</i></p>	

**Tabla 4.15: Comparativa de las ecuaciones de cálculo de la capacidad máxima para las distintas estrategias avanzadas de control**

De las ecuaciones se deduce que el valor de la resistencia en la carga está directamente relacionado con el condensador máximo que es posible conectar mediante el SSPC, de este modo para resistencias mayores, se pueden conectar condensadores mayores; y que los tiempos de conexión están directamente relacionados con el valor del condensador. En todos los casos las relaciones de corriente nominal y corriente máxima es un factor que influye en el cálculo del condensador, donde una mayor corriente máxima permite cargar un mayor condensador en la carga.

## **4.8 Conclusiones**

En este capítulo, se ha realizado un análisis detallado de cinco procedimientos de conexión de cargas altamente capacitivas, mediante circuitos de control con elementos pasivos y activos. En este grupo de procedimientos analizados, se han presentado nuevas propuestas de estrategias avanzadas de control activo de la corriente por el SSPC, que permiten conectar cargas altamente capacitivas.

En cada uno de los métodos de conexión de cargas altamente capacitivas, se han definido las ecuaciones sencillas que permiten calcular el condensador máximo en función del tiempo de la conexión, la corriente nominal, la corriente máxima y el valor de la parte resistiva de la carga. Estos valores se han simulado, de forma que se han validado las ecuaciones presentadas a lo largo del capítulo.

Teniendo en cuenta los diferentes análisis realizados y las estrategias planteadas se puede concluir, que para la conexión de cargas altamente capacitivas, la utilización de los procedimientos de control activo propuestos, permiten disminuir los transitorios de conexión de las cargas muy capacitivas y evitar las sobrecorrientes no deseadas por el SSPC, reduciendo las perturbaciones. Además, mediante estos procedimientos se minimiza el número de semiconductores necesarios para la conmutación del SSPC, debido al mayor aprovechamiento de los semiconductores. De modo que, se reduce el tamaño y volumen de los SSPC, incrementando la fiabilidad del dispositivo.

En el capítulo 6 se realizará la validación experimental de las diferentes estrategias presentadas en este capítulo, mediante un prototipo diseñado y construido dentro del marco de la tesis doctoral.

## **4.9 Referencias**

- [Friedman92] Friedman, S. N., “Solid-state Power Controller for the Next Generation”. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE Volume 7, Issue 9. September 1992: 24-29.
- [Piskunov83] Calculo diferencial e integral; N. Piskunov. Montaner y Simón. 1983.
- [PSIM] PSIM® Professional Version; Copyright Powersim Inc. Web available: <http://www.powersimtech.com/>
- [Mussma03] Mussmacher, K. A.; P.E. and Froeb, W. L. “SSPC Handle Heavy Loads With Fold-back Current Limiting”. National Hybrid Inc., Ronkonkoma, N.Y. Power Electronics Technology. January 2003.
- [RD160] “Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment”. RTCA/DO-160E, RTCA Inc. December 9, 2004.
- [Serway92] Física; R. A. Serway; McGraw-Hill. Tercera Edición. 1992. Tomo II. Páginas 725-744.
- [Sedra04] Microelectronic Circuits; Adel S. Sedra and Kenneth C. Smith Oxford University Press. Fifth edition. 2004. Page(s): 235-359 and 1249-1270
- [Shue10] Power MOSFET Thermal Instability Operation Characterization Support. John L. Shue and Henning W. Leidecker. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland . NASA. April 2010.
- [Simon93] Simon J. J., “State of the Art in Solid State Power Controller for Aeronautical Application”. The European Power Electronics Association. September 1993: 121-126.
- [STY60NM] STY60NM50, Power MOSFET; STMicroelectronics, 2003. Technical Data Datasheet. Web available: <http://www.st.com/>
- [50N60B2] 50N60B2 Power IGBT. Technical Data Datasheet.

# Capítulo 5

## **5. MODELADO DEL CONTROLADOR DE POTENCIA DE ESTADO SÓLIDO (SSPC)**



## ÍNDICE CAPÍTULO 5

---

5.1	INTRODUCCIÓN .....	195
5.2	ESTRATEGIAS DE MODELADO DEL SSPC.....	196
5.3	MODELADO ESTRUCTURAL.....	198
5.3.1	Bloques y parámetro, del modelo estructural.....	198
5.3.2	Modelo del semiconductor interno del SSPC.....	199
5.3.3	Modelado del driver de control y la fuente interna de alimentación .....	202
5.3.4	Modelado del Control e Interfaces.....	204
5.3.5	Modelado de la curva de funcionamiento $I^2t$ y protección contra cortocircuito.....	205
5.3.5.1	Generación de las tablas de búsqueda (wire-Temp) y (wire- $I^2t$ ).....	210
5.3.6	Simulaciones de verificación de las curvas $I^2t$ .....	213
5.3.6.1	Simulación con distintos modelos de SSPC con curva $I^2t$ clásica y compensada.....	215
5.3.6.2	Simulación con mismo modelo de SSPC y distintos niveles de corriente constante .....	217
5.3.6.3	Simulación con mismo modelo de SSPC y distinta temperatura ambiental .....	218
5.3.6.4	Simulación con distintos modelos de SSPC, variando los tiempos de reconexión.....	219
5.3.7	Simulaciones de la respuesta dinámica del modelo estructural del SSPC.....	220
5.4	MODELADO COMPORTAMENTAL.....	222
5.4.1	Modelado del estado estacionario (Bloque A) .....	224
5.4.2	Modelado de las conmutaciones (Bloque B) .....	224
5.4.3	Modelado de la protección contra sobrecorriente y la curva $I^2t$ (Bloque C).....	227
5.4.4	Modelado del bloque del semiconductor (Bloque D).....	229
5.5	COMPARATIVA DE LOS MODELOS .....	230
5.6	VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO COMPORTAMENTAL DEL SSPC .....	232
5.6.1	Validación dinámica del modelo del SSPC .....	233
5.6.1.1	Validación del modelo de Sensitron incluido en un modulo de 8 SSPC .....	236
5.6.2	Validación del modelo de la curva $I^2t$ .....	239
5.7	CONCLUSIONES .....	241
5.8	REFERENCIAS .....	243





## 5.1 Introducción

Como se ha descrito en el capítulo 3, el SSPC presenta ciertos problemas cuando se integra dentro de los SDPE embarcados. Uno de los problemas, detectado en este componente, está relacionado con la limitación que existe a la hora de conectar cargas altamente capacitivas, analizado en el capítulo 4. Por otra parte, también se ha descrito, en los capítulos anteriores, la necesidad del uso de herramientas de simulación, las cuales permitan prever las distintas problemáticas que se va a encontrar el SSPC dentro de los sistemas reales en operación, y que además ayuden a mejorar el diseño del componente durante su fase de desarrollo. No obstante, en la actualidad no hay modelos disponibles de este dispositivo en las librerías estándar de las herramientas de simulación existentes en el mercado, como son: PSPICE, PSIM, MATLAB, etc., debido principalmente a su reciente aplicación dentro de los sistemas embarcados y al recelo de los fabricantes de proporcionar información adicional del dispositivo.

De este modo, los objetivos concretos en este capítulo se centran en:

- Primeramente, desarrollar un modelo estructural, basado en la estructura interna del componente, que de soporte al diseño de un posible prototipo de SSPC. De modo que se identifiquen las limitaciones y problemas del componente, durante las fases de diseño previas a la fabricación en serie del SSPC. Además, dentro del modelo se incorporarán las diferentes protecciones, así como la curva  $I^2t$  con el concepto de memoria térmica y disipación térmica.
- En segundo lugar, se va a realizar un modelo genérico de SSPC que permita cubrir un mayor rango de fabricantes, y que sea independiente de la estructura interna del componente, de forma que se reduzca el número de señales procesadas durante la simulación y permita la simulación de varios componentes a nivel de SDPE, con tiempos de simulación razonables. Este modelo comportamental, aplicable a diferentes fabricantes, incluye las protecciones basadas en la curva  $I^2t$ . Además, se pretende validar experimentalmente el modelo comportamental con distintos SSPC comerciales, con diferentes tipos de cargas y dentro de un SDPE.

## 5.2 Estrategias de modelado del SSPC

El modelado es una pieza clave en el diseño de los nuevos SDPE embarcados, ya que permite anticipar los problemas que puedan surgir como consecuencia de la utilización de los SSPC. No se puede olvidar, que el carácter electrónico de este dispositivo tiene un considerable impacto en los nuevos SDPE, poco conocido en comparación con los convencionales dispositivos de protección. En los últimos años, se han presentado diferentes estudios en los cuales el modelado ha sido la herramienta utilizada para prever y solucionar las problemáticas dentro de los diferentes sistemas y componentes embarcados.

De este modo, en los años noventa [KwaSur94] muestra la utilidad del modelado, a la hora de verificar el comportamiento de cada uno de los dispositivos, durante los transitorios del sistema de potencia y las protecciones. En esta referencia se presentan las capacidades de los modelos funcionales generados del SSPC y otras protecciones, todas ellas utilizadas dentro de una estación espacial. Estos modelos permiten realizar las comprobaciones necesarias para validar el sistema de potencia y el sistema de protección, así como, ver posibles efectos de una protección sobre el resto del sistema.

Otro sistema donde el modelado ha sido una herramienta clave para detectar los fallos de funcionamiento fue en la Estación Espacial de la NASA. A raíz de los problemas detectados en su sistema eléctrico, se modeló el comportamiento del SSPC para poner de manifiesto la influencia de las capacidades parásitas de los semiconductores que componen el SSPC (MOSFET) en la estabilidad global del sistema eléctrico [Panov96].

Existen diferentes alternativas a la hora de realizar el modelado de los diferentes componentes que forman parte del SDPE, como pueden ser los SSPC, de las que se pueden destacar el **modelado estructural**, como el utilizado en la estación espacial de la NASA [Panov96], y el modelado comportamental.

Normalmente, el modelo analítico de un SSPC está basado en la estructura real del dispositivo, por lo que es necesario conocer la estructura y los componentes que lo constituyen internamente para realizar el modelado [Barrado08] [Panov96]. Los modelos

estructurales conmutados permiten realizar simulaciones muy precisas. No obstante, uno de los problemas principales de los modelos estructurales es el nivel de información necesaria para la construcción del modelo. Cada bloque de estos modelos tiene que ser definido con gran nivel de detalle, lo cual provoca que la simulación de un sistema completo necesite tiempos de simulación muy grandes, y además puedan aparecer graves problemas de convergencia. Estos dos inconvenientes son debidos principalmente al elevado número de variables procesadas, incluso cuando los modelos son promediados [Tam95]. Por lo tanto, es complicado validar el funcionamiento de grandes sistema por medio de este tipo de modelos, siendo necesario el desarrollo de otro tipo de modelos.

Por el contrario, los **modelos comportamentales** no tienen en cuenta la estructura interna del dispositivo y únicamente modelan las señales de entrada y salida que interesan desde el punto de vista eléctrico del sistema, por lo que tienen un bajo coste computacional, y los parámetros son configurables a partir de las hojas de datos de los fabricantes y de las mediciones experimentales. Un inconveniente importante a la hora de simular un SDPE, es la falta de modelos adecuados para algunos de los componentes, tales como los SSPC, debido principalmente a la falta de información por temas de confidencialidad. Los modelos comportamentales tratan de evitar los inconvenientes antes mencionados ya que no requieren el conocimiento de la estructura interna de los componentes [Valdivia09].

En los siguientes párrafos se presentan dos alternativas de modelado de un SSPC. La primera estrategia se basa en modelos estructurales que se generan a partir de la estructura interna de un SSPC real [Barrado08]. La segunda está fundamentada en modelos comportamentales de SSPC generados a partir de las mediciones experimentales y las hojas de características facilitadas por los fabricantes [Barrado09].

### 5.3 Modelado Estructural

Teniendo en cuenta los problemas que aparecen en el desarrollo de un SSPC, durante la fase de diseño del dispositivo, es conveniente realizar el modelado estructural del componente. Así pues, en este apartado se describe un modelo estructural, que permite cambiar la configuración interna del componente, modificando los valores de los parámetros internos, con el objetivo de validar previamente el comportamiento del SSPC con diferentes tipos de cargas y condiciones de funcionamiento, durante toda la fase de diseño. El modelo del SSPC ha sido generado en la herramienta de simulación PSIM ® [PSIM].

#### 5.3.1 Bloques y parámetro, del modelo estructural

El modelo estructural se ha dividido en todos los bloques que constituyen un SSPC real, ver Figura 5.1, y los cuales han sido descritos en el capítulo 3:

- Semiconductor de potencia (MOSFET),
- Driver de control del semiconductor,
- Bloque de interface y control,
- Protección  $I^2t$  y protección instantánea sobrecorriente, con una protección térmica del cable, donde se ha incluido también el efecto de la memoria térmica.

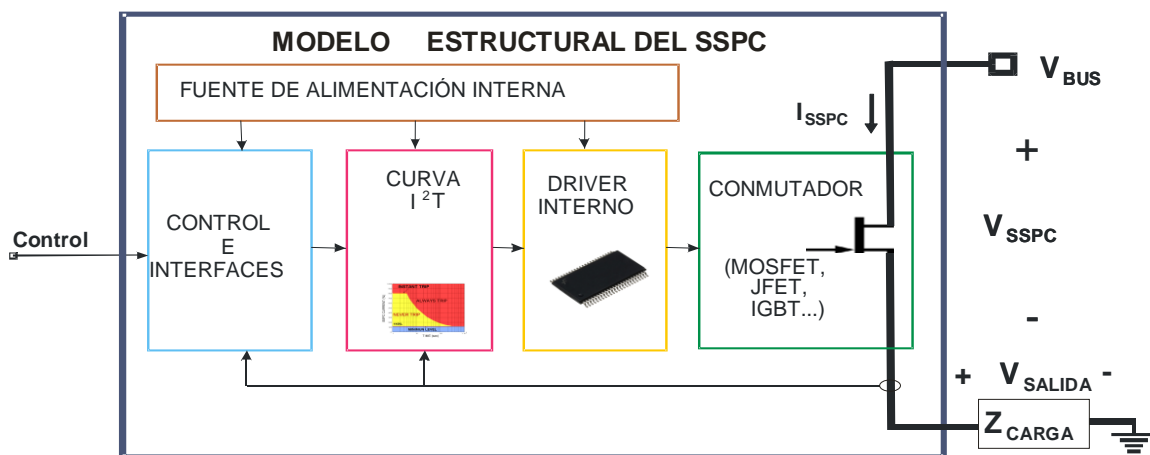


Figura 5.1: Modelo estructural del SSPC

Por otro lado, se puede destacar los parámetros que son configurables dentro del modelo del SSPC:

- Tiempo de reconexión (*Reset Time*)
- Tiempo de bajada o apagado (*Fall Time*)
- Tiempo de subida o encendido (*Rise Time*)
- Resistencia en conducción
- Retardo en el tiempo de encendido.
- Retardo en el tiempo de apagado.

Otro importante efecto que incluye el modelo estructural generado del SSPC, es la posible configuración de su funcionamiento térmico, mediante el ajuste de los siguientes parámetros configurables:

- Efecto de la temperatura ambiental
- Datos de disipación térmica del cable situado aguas abajo del SSPC

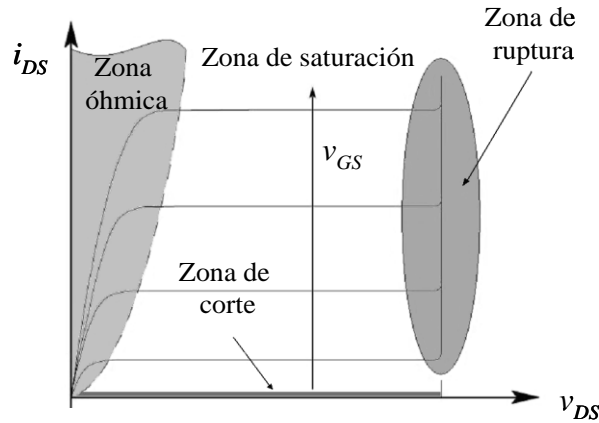
En los siguientes apartados se detallan cada uno de los bloques modelados.

### 5.3.2 Modelo del semiconductor interno del SSPC

Una vez seleccionado PSIM, como la herramienta para el desarrollo del modelo estructural, es necesario generar los modelos particulares de algunos de los componentes utilizados en la implementación del SSPC, como puede ser el MOSFET. Esto es debido a que las librerías de PSIM únicamente incluyen el modelo del MOSFET ideal en conmutación, los cuales no permiten reproducir los transitorios de la zona óhmica y de saturación del transistor. Es importante señalar que la primera referencia bibliográfica de un MOSFET modelado utilizado la herramienta PSIM, y en el cual se tiene en cuenta las diferentes zonas de funcionamiento, no aparece hasta el año 2010 [Krihely10].

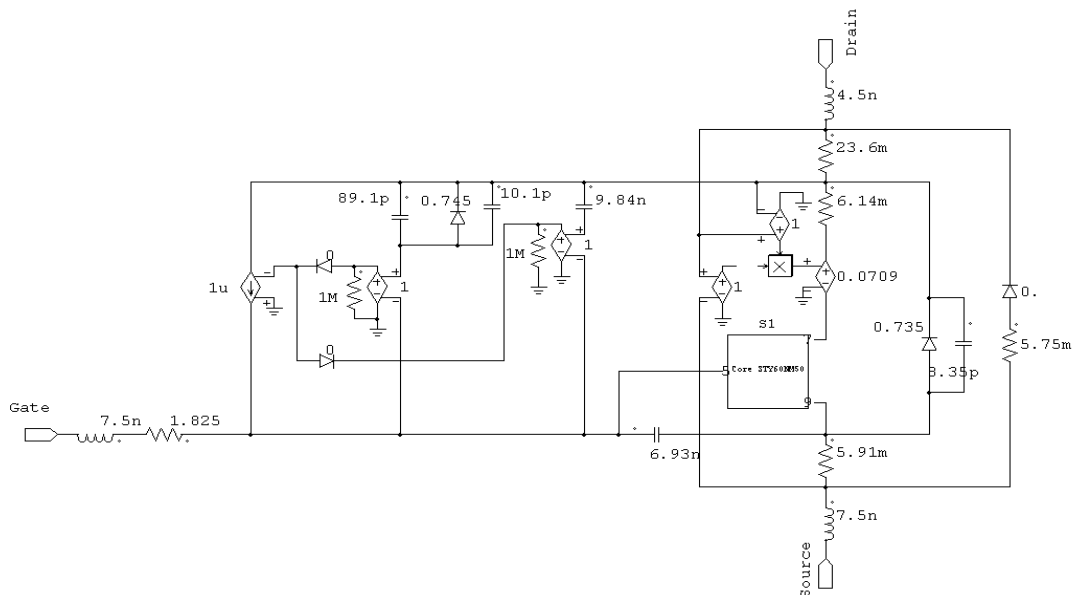
Dado que el modelado del SSPC se ha realizado con anterioridad a esta fecha, para generar el modelo en PSIM del MOSFET (STY60NM50\_ST), se ha utilizado la librería del componente usada por la herramienta de simulación Pspice [OrCAD], y distribuida

por el propio fabricante del MOSFET. Este modelo sí permite reproducir las tres zonas de funcionamiento del semiconductor, ver Figura 5.2.



**Figura 5.2: Zonas de funcionamiento de un MOSFET, con canal N**

El modelo del MOSFET generado en PSIM tiene dos niveles jerárquicos debido a su complejidad y tamaño. El primer nivel del modelo incluye todas las capacidades parásitas, resistencia en conducción y el efecto de las corrientes parásitas, de acuerdo con la librería de PSPICE proporcionada por el fabricante, ver Figura 5.3.



**Figura 5.3: Modelo de MOSFET en PSIM generado a partir de su modelo en PSPICE (STY60NM50)**

Además, el modelo de MOSFET en PSPICE incluye un núcleo, que permite simular las tres zonas de funcionamiento de este tipo de dispositivos: corte, saturación y óhmica. En la herramienta PSIM ha sido necesario desarrollar un bloque interno específico en el segundo nivel jerárquico, mediante el uso de fuentes dependientes, que reproduzcan las ecuaciones básicas de funcionamiento del MOSFET en los distintos modos de funcionamiento:

- Funcionamiento en zona de saturación [Sedra04]:

$$i_{D\_sat}(t) = \frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L} \cdot (v_{GS}(t) - V_T)^2 = k_M \cdot (v_{GS}(t) - V_T)^2 \quad (5.1)$$

- Funcionamiento en zona óhmica [Sedra04]:

$$i_{D\_ohm}(t) = \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L} \cdot \left[ (v_{GS}(t) - V_T) \cdot v_{DS}(t) - \frac{1}{2} \cdot v_{DS}^2(t) \right] = 2 \cdot k_M \cdot (v_{GS}(t) - V_T) \cdot v_{DS}(t) = \frac{v_{DS}(t)}{R_{DS_{ON}}} \quad (5.2)$$

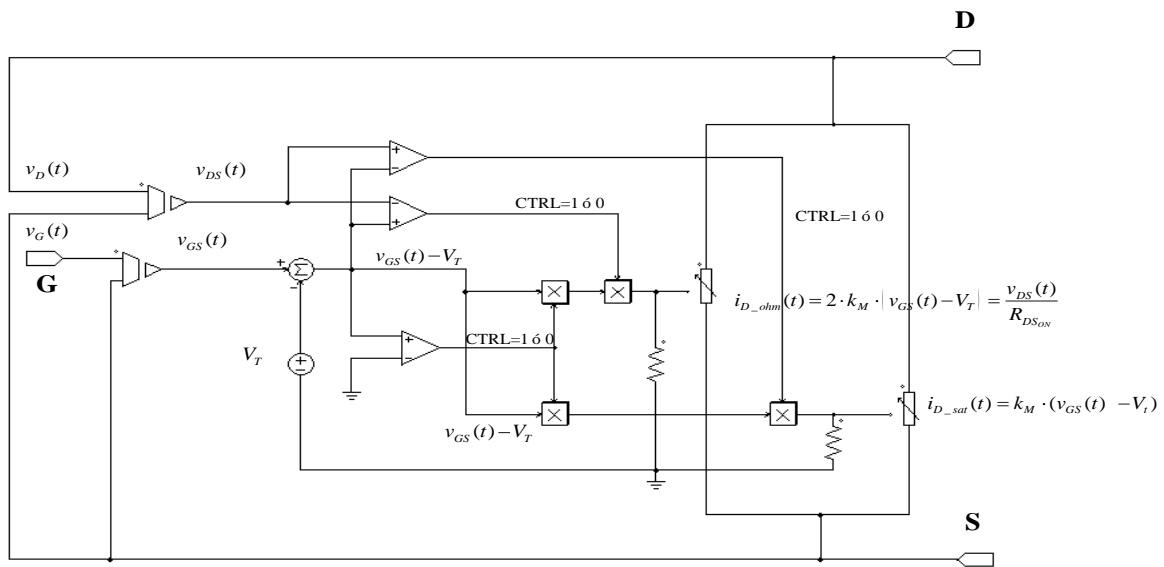
- Funcionamiento en zona de corte:

$$i_{D\_corte}(t) = 0 \quad (5.3)$$

Siendo:

$i_D$	Corriente por el drenador
$\mu_n$	Movilidad de los electrones
$C_{ox}$	Capacidad por unidad de área
$W$	Espesor de la capa de óxido
$L$	Longitud del canal
$v_{DS}$	Tensión drenador-fuente
$v_{GS}$	Tensión puerta-fuente
$V_T$	Tensión umbral
$k_M$	Constante asignada por el fabricante
$R_{DS_{ON}}$	Resistencia en conducción del MOSFET

Integrando estas ecuaciones en un modelo eléctrico, se obtiene el núcleo del MOSFET que se ha utilizado en PSIM. Así pues, como se puede apreciar en la Figura 5.4, las fuentes de corrientes introducidas ( $i_{D\_ohm}$  e  $i_{D\_sat}$ ) tienen en cuenta las diferentes señales variables  $v_G(t)$ ,  $v_D(t)$  y  $v_S(t)$ . A partir de estas señales y en función de las señales discretas de control, que a su vez están condicionadas por los modos de funcionamiento del transistor, se genera la lógica del modelo, que es función de la zona en el que se encuentre el transistor (saturación, óhmica y corte)



**Figura 5.4: Modelo eléctrico del núcleo del MOSFET (STY60NM50)**

Este segundo nivel, junto con los parámetros del primer nivel jerárquico, ver Figura 5.3, condicionan el valor de la resistencia de conducción del MOSFET y su comportamiento dinámico. De este modo, a partir de este modelo del MOSFET generado en PSIM es posible evaluar el efecto de los transitorios producidos en la conmutación de las cargas mediante el SSPC.

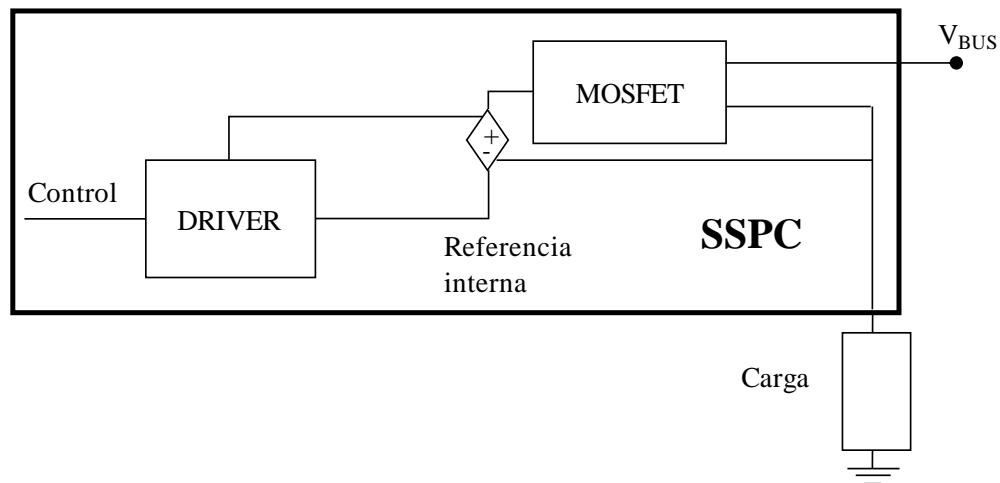
### 5.3.3 Modelado del driver de control y la fuente interna de alimentación

Para realizar el modelado de la fuente interna de suministro de alimentación aislada se han utilizado fuentes flotantes de alimentación. De este modo, se proporciona una



alimentación flotante a los diferentes bloques que constituyen el SSPC: driver, bloque de control/interfaces y el bloque  $I^2t$ /efecto térmico.

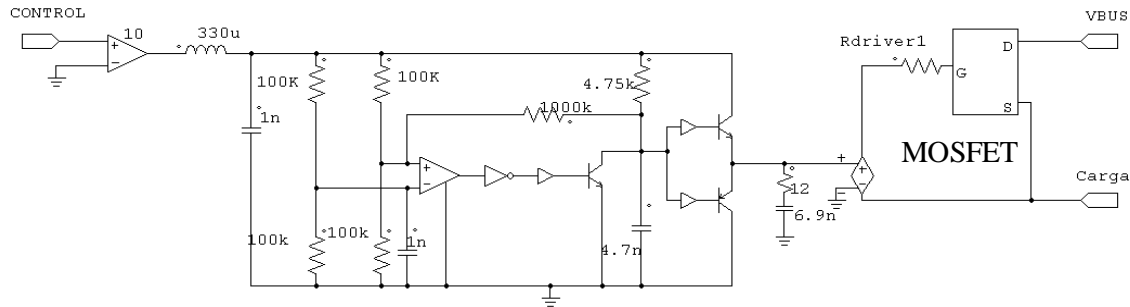
El modelo simplificado del driver permite el encendido/apagado del MOSFET, controlando la correcta conmutación del SSPC de acuerdo con los parámetros de diseño. Para un correcto disparo del MOSFET por tensión de puerta, el driver modelado está aislado de la parte de potencia, mediante fuentes dependientes de tensión. En la Figura 5.5 se puede apreciar la estructura del modelo interno del SSPC, incluyendo el bloque que simula el driver encargado del control del MOSFET y el semiconductor utilizado para conmutar las cargas.



**Figura 5.5: Estructura del modelo interno del SSPC incluyendo el driver y el MOSFET**

Es importante señalar que el driver genera una señal de control, la cual tiene una referencia flotante interna, esta disposición se ha tenido en cuenta en el modelado de este bloque.

La funcionalidad del driver de control se ha implementado en PSIM mediante comparadores, resistencias, condensadores, puertas lógicas y transistores bipolares, como se puede apreciar en la Figura 5.6.

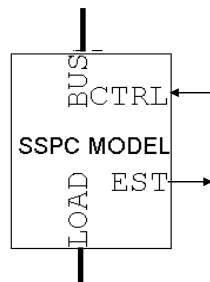


**Figura 5.6: Modelo eléctrico simplificado del driver del SSPC**

### 5.3.4 Modelado del Control e Interfaces

Como se ha visto en el capítulo 3, los SSPC tienen diferentes interfaces que le permiten tanto el control remoto como el envío de su estado al procesador central. Con estas señales se pueden mostrar, por ejemplo, la situación del elemento conmutador (encendido/apagado) ó si la corriente que le atraviesa está por encima de cierto umbral o corriente máxima. Algunos SSPC incluso presentan otros tipos de señales que puede reportar la presencia de tensión en el bus [Leach] [National] [SPDP10D] [RD160].

Para el modelo desarrollado se han simplificado el número de señales, de forma que el bloque de control/interfaces esta modelado para permitir controlar la conexión o desconexión del SSPC en todo momento, desde una fuente externa aislada o entrada de control. Por otro lado, el dispositivo, reporta el estado en el que se encuentra, activado o apagado. En este caso el modelo de SSPC tiene una salida de estado (EST) y una entrada de control (CTRL), ver Figura 5.7.



**Figura 5.7: Encapsulado del modelo estructural del SSPC**

### 5.3.5 Modelado de la curva de funcionamiento $I^2t$ y protección contra cortocircuito

El último bloque es el encargado de la protección  $I^2t$  y la protección contra cortocircuito. Por medio de este bloque, el SSPC puede ser configurado para trabajar con distintos niveles de sobrecorriente de acuerdo con la curva  $I^2t$ , ver Figura 5.8. Además, este bloque se encarga de controlar el estado de la corriente por la carga, a través de un muestreo continuo de la corriente que circula por el SSPC. Si la corriente por la carga excede de un valor máximo, el SSPC cortará el paso de corriente por el dispositivo instantáneamente, mediante la protección por cortocircuito ó corriente máxima.

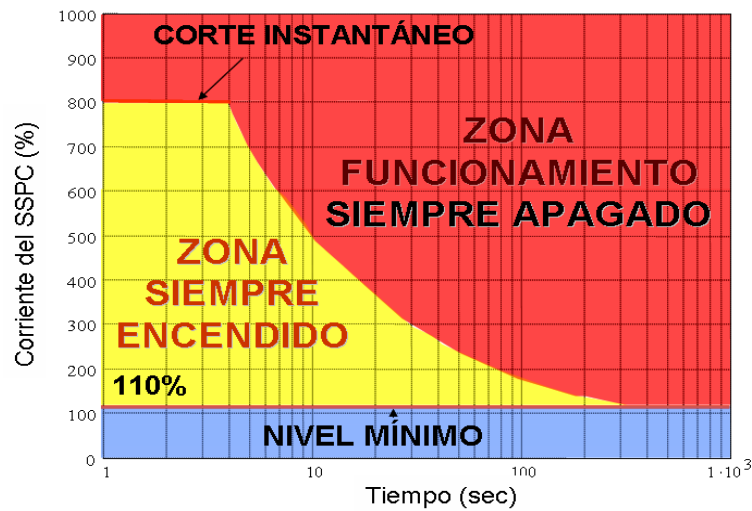


Figura 5.8: Curva estándar  $I^2t$  del SSPC

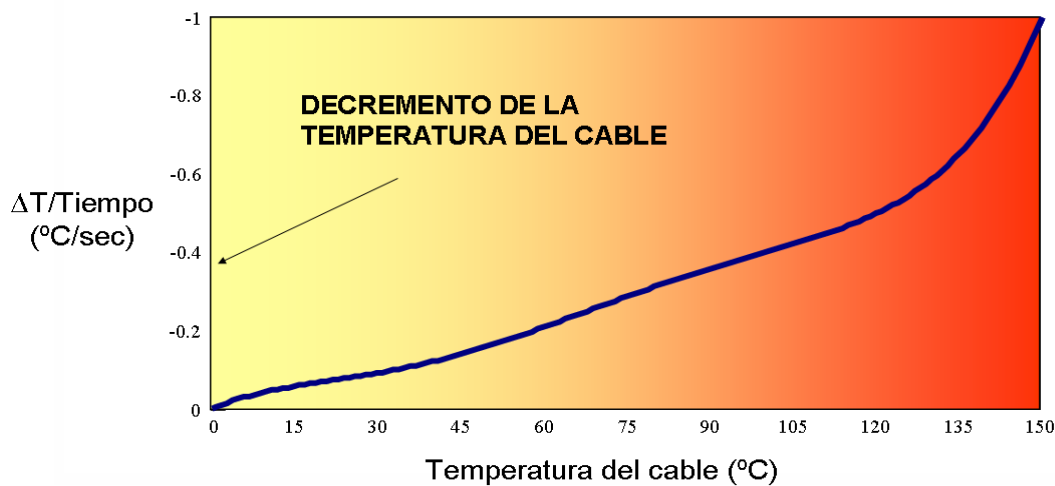
El modelo estructural del bloque de  $I^2t$ , ha sido diseñado teniendo en cuenta varios factores: **la curva  $I^2t$ , el efecto de memoria térmica y la disipación térmica del cable.** Por esta razón, en este modelo, el bloque ha pasado a ser denominado bloque de memoria térmica/ $I^2t$ . Asimismo, este bloque se ha modelado de dos formas diferentes. El primer modelo generado (normal ó clásico) únicamente tiene en cuenta la curva  $I^2t$  y la memoria térmica pero no incluye el efecto introducido por la disipación térmica del cable. El segundo modelo (compensado) tiene en cuenta la curva  $I^2t$  y la memoria térmica, y además, incluye el efecto introducido por la disipación térmica del cable, como se detalla en los siguientes párrafos. En ambos modelos se puede añadir el efecto de la temperatura ambiental.

Aunque las protecciones implementadas del SSPC están basadas en las curvas de funcionamiento de los dispositivos electromecánicos convencionales, el modelo generado del SSPC, como se ha indicado anteriormente, tiene en cuenta otros parámetros importantes como son:

- El efecto introducido por la disipación térmica del cable
- La temperatura ambiental de la localización exacta del mazo de cables.

Estos parámetros tienen una influencia en la temperatura del cable, y como consecuencia pueden modificar el tiempo de actuación de la protección del SSPC. Es importante señalar que la temperatura a bordo es un parámetro importante no solo para el cableado, sino también para todos los equipos electrónicos. Estos equipos tienen que pasar severas pruebas de calificación para poder ser instalados a bordo de cualquier avión [RD160].

De este modo, en la Figura 5.9 se muestra, a modo de ejemplo, el decremento de la temperatura por unidad de tiempo sufrido por un cable de galga 16, con un coeficiente de convención de  $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , relacionado con la temperatura en el cable.



**Figura 5.9: Evolución de la temperatura de un cable de galga 16 basada en la simulación térmica ANSYS (temperatura ambiental 0°C) [Izquierdo10]**

La introducción de la disipación térmica, en el modelo del SSPC, al que se le denominará modelo compensado, permite una mayor exactitud en el cálculo del instante en el que se alcanza la temperatura crítica a la cual se activa la protección por sobrecorriente.

A partir de los factores indicados anteriormente, el modelo de SSPC compensado ha sido diseñado con algoritmos matemáticos que contienen la siguiente información:

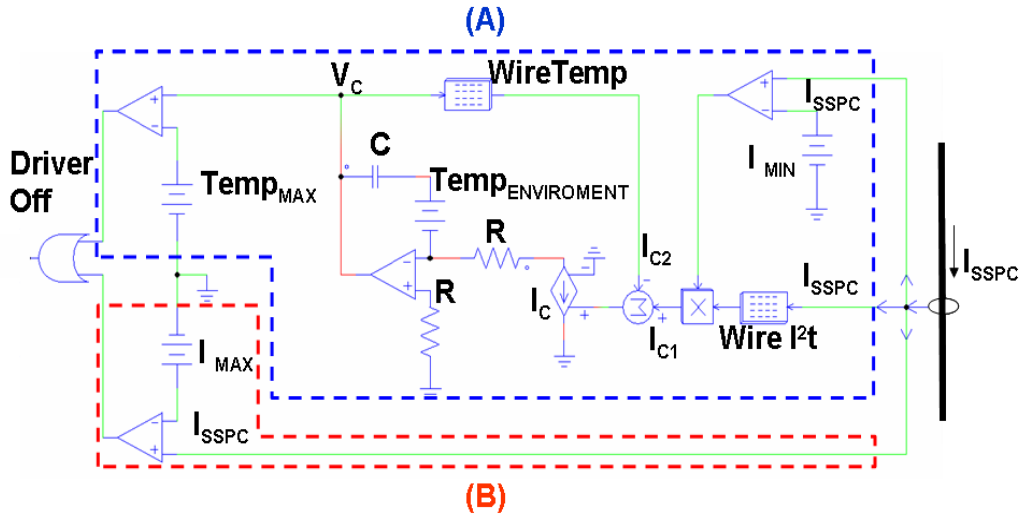
- La curva común  $I^2t$ , ver Figura 5.8.
- La evolución de la temperatura del cable, para cada uno de los niveles de corriente, ver Figura 5.9.
- La temperatura ambiental de la zona donde está ubicado el cableado o mazo de avión [SAE99] al cual protege el SSPC. Esta temperatura no es siempre la misma para todos los cables y depende de la zona de localización del cableado en el avión: cabina, bajo suelo, bodega, alas, etc.

No se debe olvidar, que se producen variaciones de la temperatura del cable, dependiendo de la temperatura en el propio cable y la temperatura ambiental, como consecuencia de la disipación del cable.

Teniendo en cuenta las hojas de características de diferentes fabricantes y la dependencia de la temperatura, el bloque de memoria térmica &  $I^2t$  del modelo del SSPC propuesto se ha dividido en dos partes, agrupadas en función de los eventos de activación de la protección, ver Figura 5.10:

- Condición de sobrecarga continua, está producida cuando la corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ) está dentro de los niveles limitados de sobrecorriente, por ejemplo niveles del 110% al 800% del valor nominal en la Figura 5.8. Bajo estas condiciones y transcurrido un determinado periodo de tiempo, se producirá el apagado del MOSFET. Este periodo de tiempo depende en primer lugar de la curva del cable  $I^2t$ , y en segundo lugar, de la evolución térmica del cable, ver zona (A)-Figura 5.10.
- Condición de cortocircuito/corriente máxima, está producida cuando la corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ) es superior a un nivel máximo permitido, por ejemplo a un nivel del 800% de la corriente nominal del SSPC, en la Figura 5.8. Bajo estas condiciones el valor se compara con el nivel máximo de corriente permitido y

cuando  $I_{SSPC} > I_{MAX}$  el driver apaga el MOSFET del SSPC, ver zona (B)-Figura 5.10.



**Figura 5.10: Implementación del modelo de la protección  $I^2t$  y cortocircuito**

Con el objetivo de modelar la condición de sobrecarga continua, ha sido necesario realizar un símil entre temperatura y la tensión. Además, para facilitar el modelado del componente y el funcionamiento de la curva  $I^2t$  con memoria térmica y el efecto de la disipación térmica del cable, es necesaria la definición de dos tablas de datos (*look-up tables*), que tienen en cuenta los siguientes parámetros:

- $V_C$  es el nivel de tensión que representa la temperatura por el cable ( $1\text{ V} = 1\text{ }^\circ\text{C}$ ).
- Tabla de datos que incluye la  $I^2t$  y la memoria térmica del cable (Tabla de datos *Wire- $I^2t$* , en la Figura 5.10).
- Tabla de evolución de la temperatura del cable y disipación térmica (Tabla de datos *Wire-Temp*, en la Figura 5.10).

En la Figura 5.10, la corriente medida del SSPC ( $I_{SSPC}$ ), proporciona la entrada a la primera tabla (*Wire- $I^2t$* ), la cual suministra parte del valor del generador de corriente dependiente,  $I_{C1}$ . La segunda tabla (*Wire-Temp*) proporciona una realimentación negativa al generador de corriente,  $I_{C2}$ ; este valor depende de la disipación producida en el cable,

de acuerdo a la Figura 5.9. A partir de estos dos valores se obtiene  $I_C$ , valor de corriente encargada de cargar el condensador (C), de acuerdo a la siguiente ecuación (5.4):

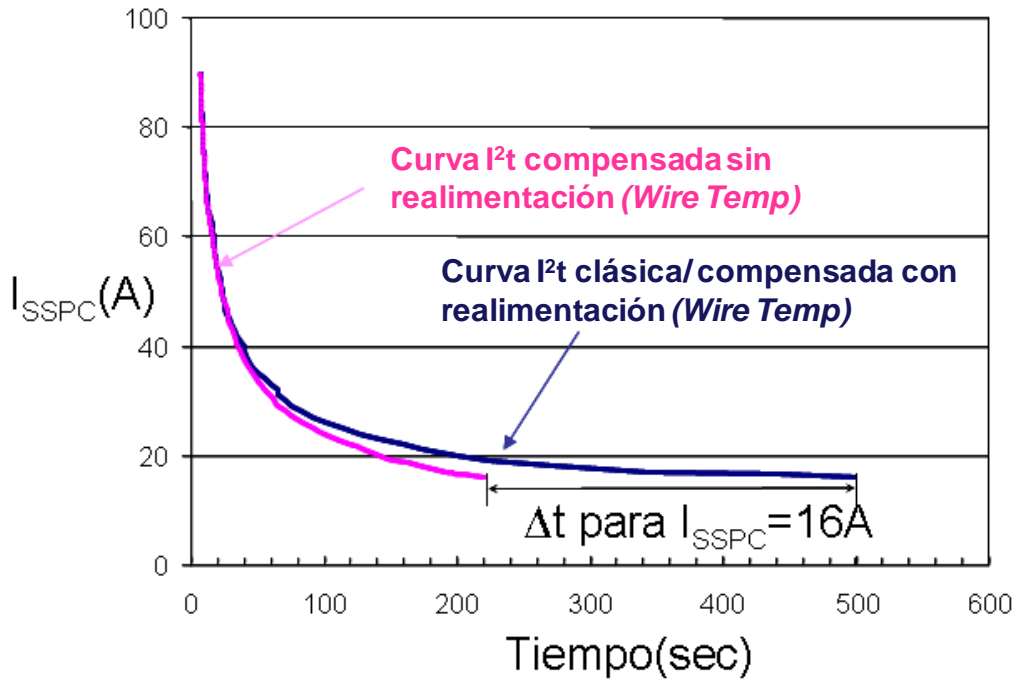
$$V_C = I_C \cdot \frac{\Delta t}{C} \quad (5.4)$$

Donde  $\Delta t$  es el tiempo durante el cual se aplica la corriente  $I_C$ , para la carga del condensador C.

Si no hay disipación térmica del cable (temperatura del cable = temperatura ambiente), el valor  $I_C$  sólo depende de la primera tabla (*Wire-I<sup>2</sup>t*), es decir  $I_C = I_{C1}$ , lo que provoca un incremento de  $V_C$ . Por el contrario, cuando la corriente por el SSPC es igual a cero y la temperatura del cable es mayor que la temperatura ambiental,  $I_C$  es sólo función de la segunda tabla (*Wire-Temp*),  $I_C = -I_{C2}$ , lo que provoca un decremento de  $V_C$  (caída de la temperatura del cable). Cuando  $V_C$  es igual al límite máximo de temperatura permitido (TempMAX), el driver se encarga de cortar la corriente por el SSPC, ver Figura 5.10.

De esta forma, la segunda tabla, que incluye los valores de  $I_{C2}$  es sólo dependiente de la temperatura del cable y la temperatura ambiental, Figura 5.9. Sin embargo, la primera tabla (*Wire-I<sup>2</sup>t*), la cual proporciona los valores de  $I_{C1}$  tiene en cuenta  $I^2t$  y los datos de disipación térmicos del cable incluido en la segunda tabla (*Wire-Temp*), de acuerdo con la Figura 5.9. Por medio de estas dos tablas de datos, el modelo genérico de SSPC puede estimar la temperatura del cable, en relación con la corriente por el SSPC, la disipación del cable y la temperatura ambiental. Para el cálculo de las dos tablas ha sido necesario la generación de un algoritmo en Mathcad® [Mathcad] detallado en el epígrafe 5.3.5.1.

Asimismo, es importante señalar como afecta la compensación por la disipación térmica del cable, a los tiempos de activación de la protección  $I^2t$ , para una sobrecorriente determinada. En la Figura 5.11, se puede apreciar una comparativa entre las curvas  $I^2t$  normal, compensada sin realimentación (*Wire-Temp*) y compensada con realimentación (*Wire-Temp*). La curva  $I^2t$  compensada se obtiene a partir de la curva  $I^2t$  clásica, a la que se añade el parámetro de la realimentación  $I_{C2}$ , a través del circuito incluido en Figura 5.10.



**Figura 5.11: Comparativa de los modelos de las curvas  $I^2t$  normal y compensada**

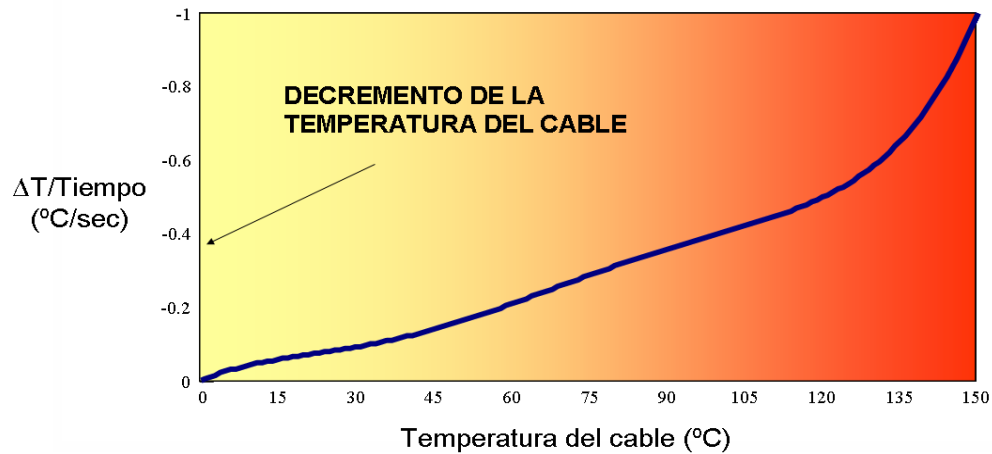
Comparando ambas curvas es apreciable que aparecen grandes diferencias en los tiempos de activación de la protección con bajos niveles de corriente; por ejemplo, se tiene una diferencia de 280 segundos para una corriente por el SSPC de 16 A (110%).

Sin embargo, la curva  $I^2t$  compensada sin realimentación, Figura 5.11, una vez incluido el valor de la realimentación de  $I_{C2}$  en el modelo del SSPC, presenta los mismos tiempos de activación que la curva  $I^2t$  clásica (curva  $I^2t$  compensada con realimentación), ver Figura 5.11.

#### 5.3.5.1 Generación de las tablas de búsqueda (wire-Temp) y (wire- $I^2t$ )

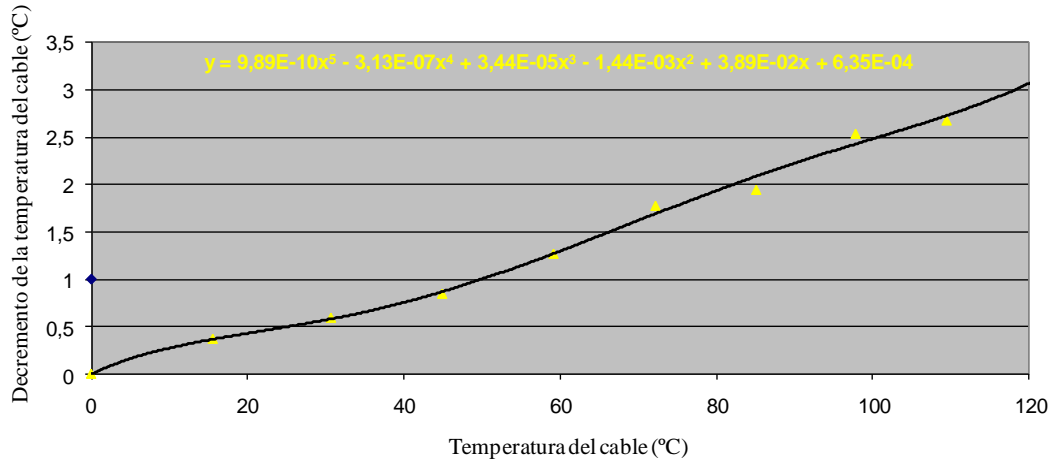
Para validar el efecto del enfriamiento del cable se ha realizado una simulación en la herramienta ANSYS, con un cable de galga 16, a una corriente pulsante cuadrada, que varía entre 0 A (6 segundos) y 45 A (4 segundos), en un intervalo total de tiempo de 100 segundos [Izquierdo10]. Los resultados obtenidos se representan en la Figura 5.12 (que se corresponde a los mismos datos que la Figura 5.9).





**Figura 5.12: Evolución de la temperatura de un cable de galga 16 basada en la simulación térmica ANSYS (temperatura ambiental 0°C) [Izquierdo10]**

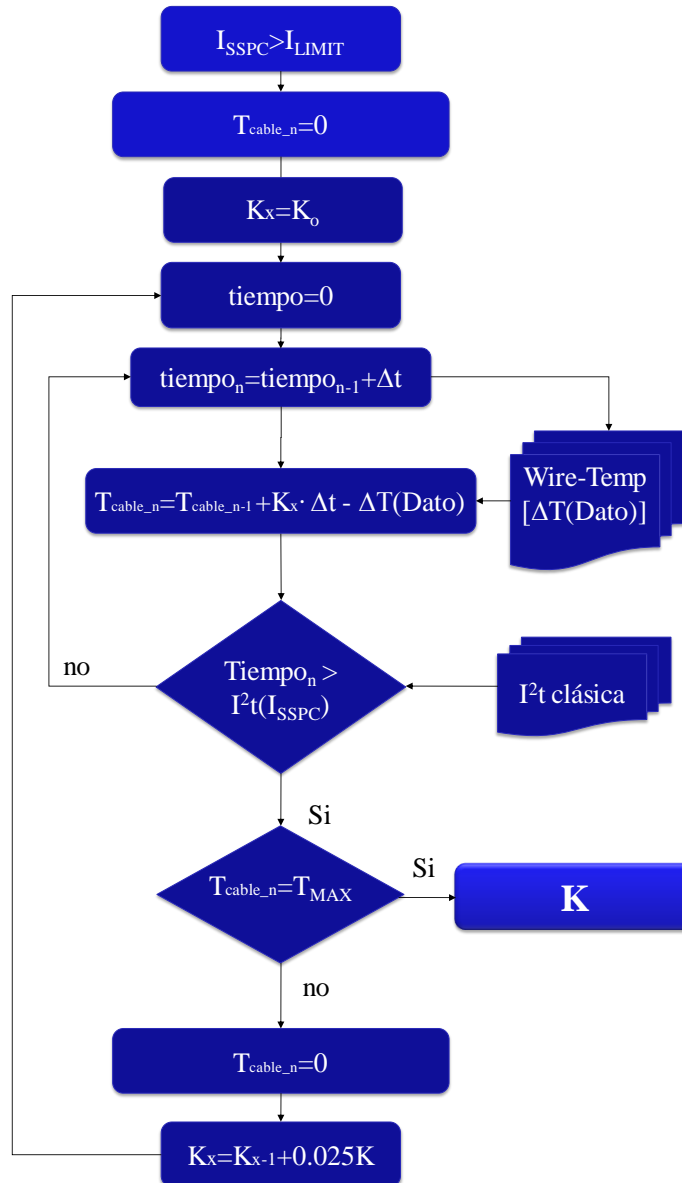
Teniendo en cuenta estos datos y mediante la herramienta Excel, se ha interpolado el polinomio que permite obtener el valor del decrecimiento de la temperatura del cable, en seis segundos, en función del rango de valores de temperatura, ver Figura 5.13.



**Figura 5.13: Función generada en Excel del decrecimiento de la temperatura del cable, en 6 segundos, en función de la temperatura del cable**

Mediante el polinomio que relaciona la temperatura del cable con el decrecimiento de la temperatura del cable, e interpolando para todo el rango de temperaturas se puede generar la primera tabla de búsqueda (*Wire-Temp*). Esta tabla tiene como parámetro de entrada la temperatura del cable y a la salida proporciona una variable que reduce la temperatura del

cable, que en el modelo de la Figura 5.10 corresponde con  $I_{C2}$ . Por otro lado, es necesario calcular el valor  $I_{C1}$ . Este dato lo proporciona la tabla de búsqueda ( $wire-I^2t$ ), la cual se ha calculado mediante el algoritmo en Mathcad, descrito en la Figura 5.14.

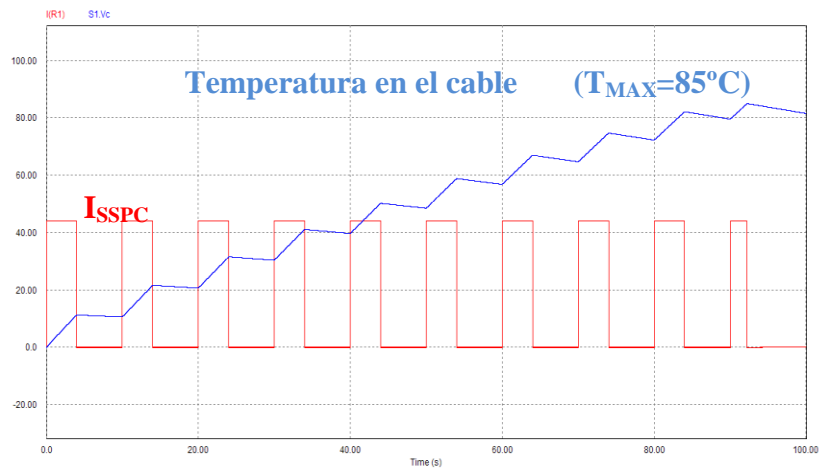


**Figura 5.14: Algoritmo de cálculo de la tabla de búsqueda wire- $I^2t$ , compensada con la disipación térmica del cable**

Este algoritmo tiene en cuenta el decremento de la temperatura en el cable (*wire-temp*), el incremento de la temperatura del cable producido por el nivel de corriente, y la curva de

activación  $I^2t$  clásica por la disipación térmica del cable. La salida de este algoritmo proporciona el valor de  $I_{C1}$  para cada uno de los valores de corriente por el SSPC. En el algoritmo el valor de  $I_{C1}$  para cada una de los niveles de sobrecorrientes, corresponde con la variable de salida K, ver Figura 5.14.

A partir de esta tabla se puede reproducir el comportamiento de la simulación en ANSYS mediante la herramienta PSIM, ver Figura 5.15. En la simulación en PSIM, además, se ha introducido la protección por sobretensión al alcanzar los 85 °C en el cable, y por lo tanto se interrumpe el paso de corriente.



**Figura 5.15: simulación del modelo de la temperatura del cable**

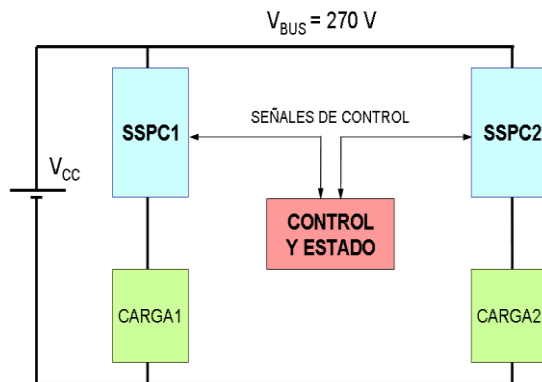
### 5.3.6 Simulaciones de verificación de las curvas $I^2t$ .

Para la simulación del modelo estructural se han seleccionado valores típicos de las diferentes hojas de características de los distintos fabricantes y se han introducido en el modelo del SSPC [Leach] [National] [SPDP10D].

Con este modelo se han obtenido diferentes tipos de simulaciones, las cuales se puede dividir en dos grupos. Un primer grupo de simulaciones donde se reproducen las condiciones de actuación de las curvas  $I^2t$  a lo largo del tiempo, con cargas de carácter resistivo. Y un segundo grupo de simulaciones, en las cuales se muestra el comportamiento dinámico del modelo ante diferentes cargas. Los resultados

experimentales del prototipo de SSPC desarrollado, en esta tesis doctoral, se presentan en el capítulo 6, una vez presentado el prototipo.

Para la realización de todas las simulaciones se ha utilizado un banco de pruebas virtual generado en la herramienta de simulación PSIM, ver Figura 5.16, el cual permite probar la funcionalidad del SSPC, de una forma sencilla, a través de diferentes simulaciones, con la misma o diferentes configuraciones del SSPC.



**Figura 5.16. Banco Virtual de pruebas para dos SSPC**

El modelo de SSPC generado, permite ser configurado con diferentes parámetros y condiciones de sobrecarga, por lo que se han realizado simulaciones con diferentes configuraciones del modelo, las cuales proporcionan la posibilidad de comparar las capacidades del modelo realizado.

Los modelos que se han utilizado durante las simulaciones están basados en características, las cuales han sido extraídas de las hojas de datos de varios fabricantes:

- Tensión de entrada del dispositivo:  $270\text{ V}_{DC}$ .
- Corriente Nominal  $I_N = 15\text{ A}$ ,  $I_{MAX} = 120\text{ A}$  (800%).
- Corte instantáneo de corriente:  $I_{SSPC} > 800\%$ .
- $t_{rise} < 500\text{ }\mu\text{s}$ ,
- $t_{fall} < 500\text{ }\mu\text{s}$ .
- Actuación de la protección por  $I^2t$ :  $110\% < I_{SSPC} < 800\%$ .

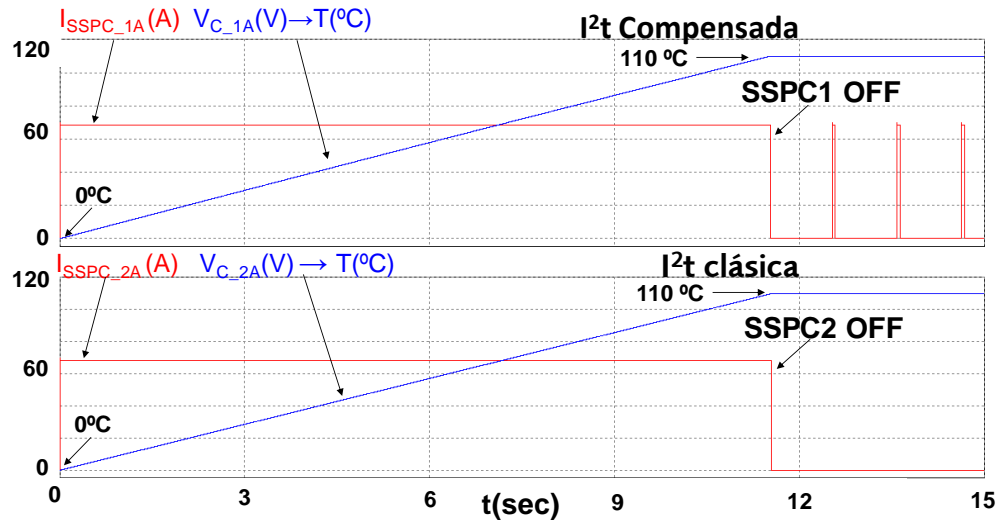
En las siguientes simulaciones se han validado los tiempos de las curvas  $I^2t$ , el efecto de memoria térmica, la disipación térmica, y la protección por sobrecorriente. Todos estos

parámetros han sido incluidos en el modelo del SSPC. Para diferenciar cada una de las pruebas, durante la realización de las simulaciones, cada experimento se ha etiquetado con las letras del abecedario (A, B, C y D) en cada uno de los dos SSPC que componen el banco virtual (1 y 2). Señalar que las simulaciones muestran la corriente por los SSPC y la tensión del condensador  $V_C$ , que representa la temperatura a la que se encuentra el cable, de acuerdo con la descripción realizada anteriormente.

Un problema que se ha detectado a lo largo de todas las simulaciones, como consecuencia del elevado número de componentes y capas del modelo estructural son los elevados tiempos requeridos para completar la simulación.

### 5.3.6.1 Simulación con distintos modelos de SSPC con curva $I^2t$ clásica y compensada

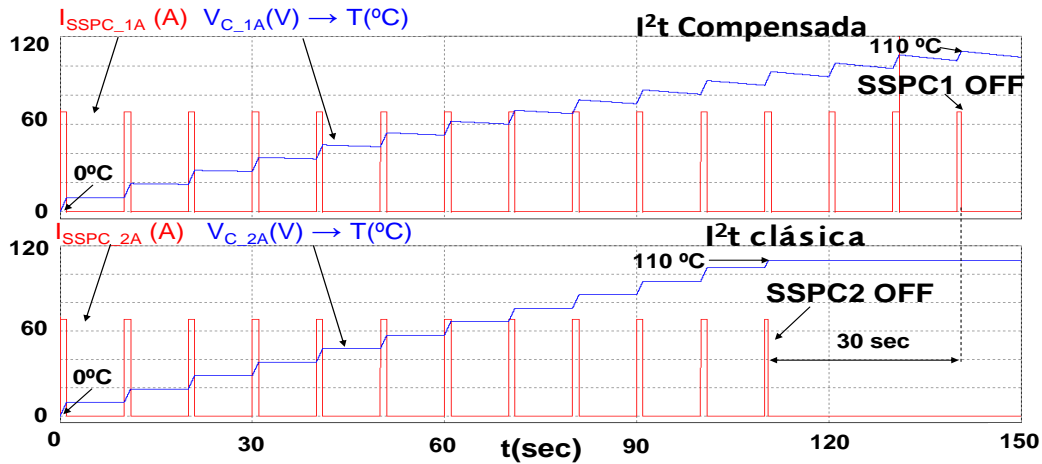
La primera y segunda simulación, Figura 5.17 y Figura 5.18, comparan dos modelos de SSPC.



**Figura 5.17: Comparativa de los modelos de los SSPC con curva  $I^2t$  clásica y compensada con efecto enfriamiento, con corriente continua de  $I=68,5$  A**

El primero (SSPC1) ha sido implementado con un modelo que incluye la curva  $I^2t$  compensada con el efecto de la disipación térmica del cable, y el segundo (SSPC2) únicamente incluye la curva clásica de  $I^2t$ . En ambos se implementará el efecto de la memoria térmica.

A partir de los resultados de las simulaciones con los dos modelos, Figura 5.17, se puede observar como para un mismo nivel de sobrecorriente constante, las protecciones actúan al mismo tiempo en ambos modelos, cuando la temperatura del cable alcanza los 110 °C ( $V_C$ ). Estos 110 °C representan el nivel de temperatura máximo admisible para un correcto funcionamiento del cable, sin peligro de daños.



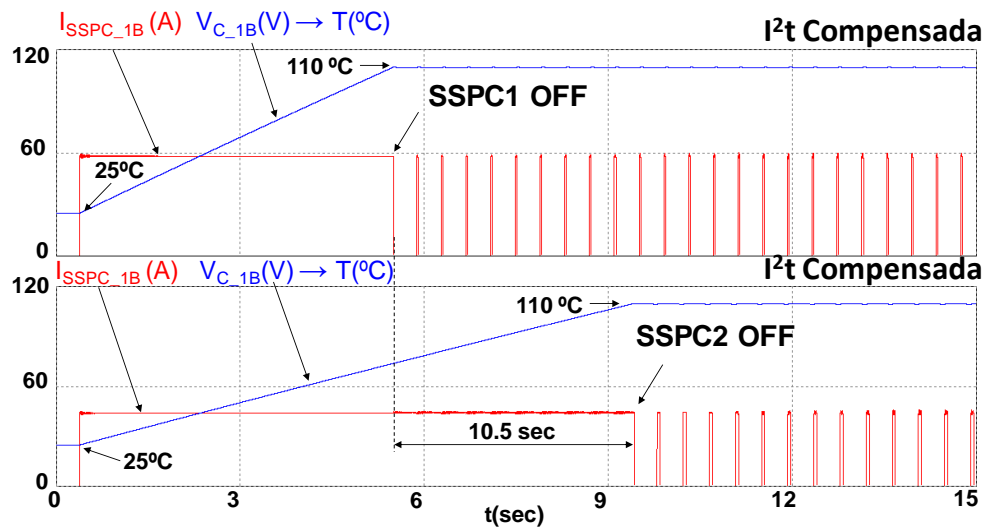
**Figura 5.18: Comparativa de dos modelos de SSPC con curva  $I^2t$  clásica y compensada con efecto enfriamiento, ante una corriente pulsante,  $I_P = 68,5$  A**

Sin embargo, en la simulación recogida en la Figura 5.18, para los mismos pulsos de corriente por los SSPC, es apreciable la diferencia entre los tiempos de activación de la protección de cada uno de los modelos de SSPC.

La evolución de la temperatura del cable ( $V_{C\_1A}$ ) estimada por el SSPC1 es más lenta que la evolución de la temperatura del cable ( $V_{C\_2A}$ ) estimada por el SSPC2, debido al efecto de la disipación producida en el cable. Como consecuencia de este efecto, el tiempo de apagado es menor para el SSPC2, con la curva común  $I^2t$ , que para el SSPC1 que incluye la curva  $I^2t$  compensada por el efecto de disipación térmica del cable. Teniendo en cuenta todo esto, es lógico que  $V_C$  evolucione de diferente forma. Así pues, mientras que  $V_{C\_2A}$  es actualizada solo con el nivel de corriente por el SSPC2, el valor de  $V_{C\_1A}$  es actualizado de acuerdo al nivel de corriente por el SSPC1 y la disipación térmica producida en el cable.

### 5.3.6.2 Simulación con mismo modelo de SSPC y distintos niveles de corriente constante

La Figura 5.19 incluye la respuesta de un modelo de SSPC (1B y 2B) con la curva  $I^2t$  compensada, y la misma temperatura ambiental del cableado (25 °C, correspondientes con la temperatura en cabina). Para esta simulación, los SSPC se han simulado con diferentes niveles de corriente, con el fin de comparar los distintos tiempos de apagado por protección contra sobrecorriente continuada.



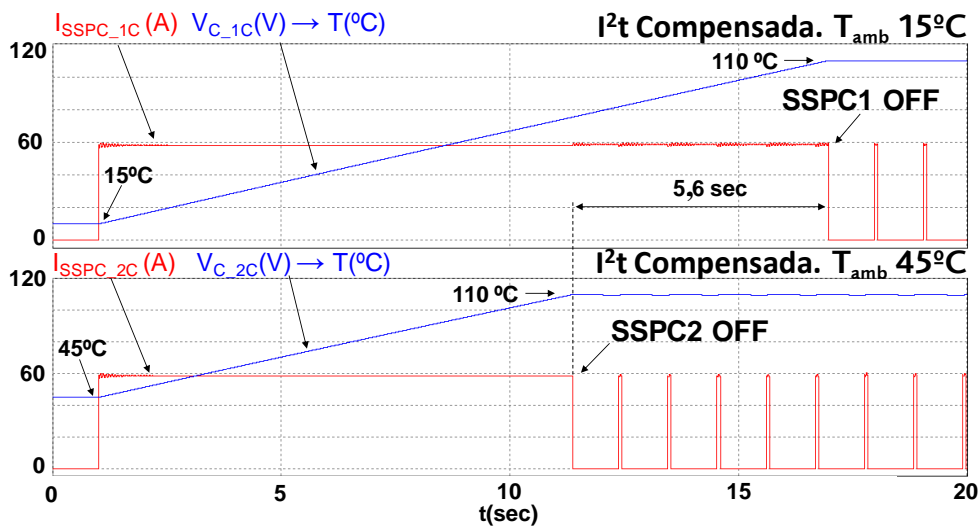
**Figura 5.19: Comparativa de los tiempos de activación de la protección  $I^2t$  compensada, con la misma temperatura ambiental del cable y diferente nivel de corriente por la carga.**

En la simulación se puede apreciar como la “protección  $I^2t$ ” es activada dependiendo de tres factores: el nivel de corriente, la evolución de la temperatura del cable y la temperatura ambiental. Cabe destacar, que para distintos niveles de corriente las protecciones son activadas en diferentes intervalos de tiempo, separados unos 10,5 segundos. Por otro lado es importante señalar, que para la simulación correspondiente con la Figura 5.19, los tiempos de activación son más cortos (con  $I_{SSPC\_B} < 60$  A) que para la primera simulación (con  $I_{SSPC\_A} > 68$  A), Figura 5.17, incluso con niveles de corriente menores. Este hecho está principalmente provocado por la influencia de la temperatura ambiental del cable, la cual ha sido tomada en cuenta en los modelos desarrollados, 0 °C en

caso de presentado en la figura Figura 5.17 y 25 °C para el caso representado en la Figura 5.19.

### 5.3.6.3 Simulación con mismo modelo de SSPC y distinta temperatura ambiental

La Figura 5.20 muestra como la localización del cable embarcado en una aeronave, modifica el tiempo de activación de la protección. La temperatura ambiental depende del área del avión donde se instale el cableado. Esto puede suponer un calentamiento adicional del cable, razón por la cual la temperatura ambiente cambia los tiempos de activación de la protección.



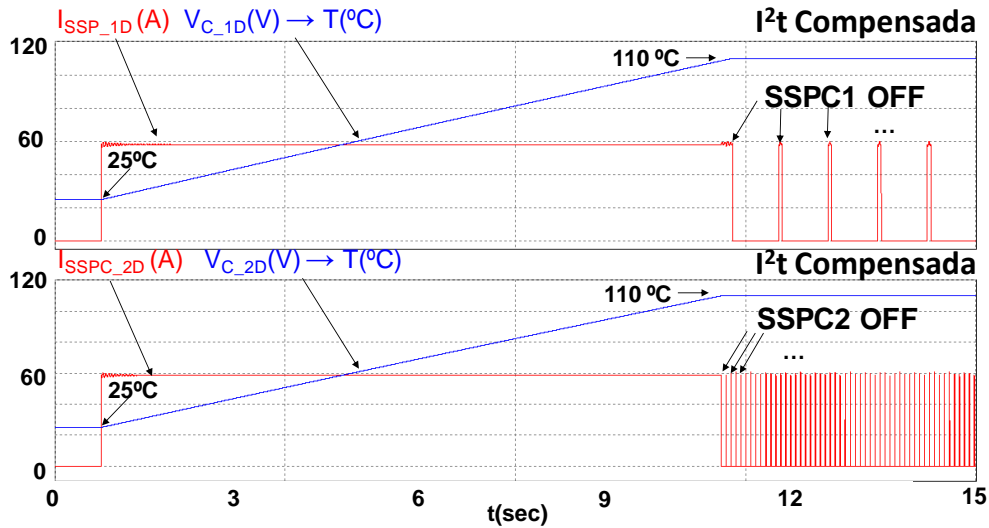
**Figura 5.20: Comparativa de los tiempos de activación de la protección  $I^2t$  compensada, ante diferentes temperaturas ambientales y el mismo nivel de corriente.**

La primera carga (SSPC\_1C) está conectada con un cable situado en una zona a 15 °C (bajo suelo, área no presurizada). La segunda carga (SSPC\_2C) está conectada con un cable que se encuentra en una zona con una temperatura de 45 °C (condiciones ambientales para cableado dentro de un armario sin una ventilación adecuada). La diferencia entre los tiempos de activación de la protección  $I^2t$  es de 5,6 segundos. Tanto el SSPC\_1C como el SSPC\_2C están modelados con la curva  $I^2t$  compensada, la cual incluye la memoria térmica y la disipación de la temperatura.



#### 5.3.6.4 Simulación con distintos modelos de SSPC, variando los tiempos de reconexión

Otra ventaja de este modelo es la posibilidad de programar la duración del tiempo de reconexión durante el apagado del SSPC. En la Figura 5.21 se muestra una comparativa entre dos tiempos de reconexión distintos, el primero (SSPC\_1D) tiene 1 segundo de tiempo de reconexión (*Reset Time*), y el segundo (SSPC\_2D) tiene 100 milisegundos. De esta forma, es posible analizar cuál de los tiempos es más conveniente para cada tipo de apagado ante cada tipo de protección: protección instantánea o por  $I^2t$ . Esto es posible gracias al modelo de SSPC generado, el cual facilita el cambio de los tiempos de reconexión, los cuales pueden ser programados en el mismo SSPC dependiendo del tipo de protección.



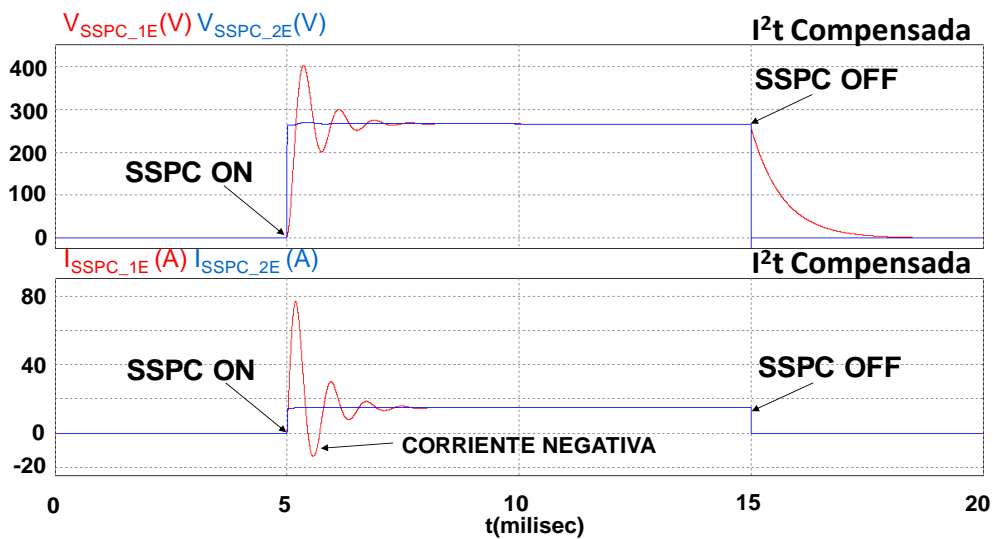
**Figura 5.21: Comparativa de la actuación de la protección con diferentes Reset Time en los modelos de SSPC con  $I^2t$  compensada**

Teniendo en cuenta que el tiempo de reconexión condiciona el periodo de enfriamiento del cable, una vez ha actuado la protección, es conveniente fijar un tiempo distinto de reconexión que dependa del tipo de apagado, con el objetivo de permitir un menor o mayor enfriamiento del cable, antes de reengancharlo nuevamente al sistema de distribución de potencia. Así pues, se incluirán tiempos de reconexión pequeños, para los cortes provocados por la protección instantánea de sobrecorriente ( $I > 120$ ), ya que en esta situación el cable no se ha calentado de forma notable. Por el contrario, si la protección ha

actuado por efecto de la protección asociada a la curva  $I^2t$ , el cable puede alcanzar altas temperaturas, por lo que es necesario un tiempo de reconexión mayor. Este tiempo va a permitir que el cable se enfríe a una temperatura normal de funcionamiento, antes de reengancharlo nuevamente al bus de distribución.

### 5.3.7 Simulaciones de la respuesta dinámica del modelo estructural del SSPC.

Además de las simulaciones mostradas en apartado anterior con cargas resistivas puras, para comprobar el funcionamiento de la curva  $I^2t$  se han realizado simulaciones con cargas de carácter inductivo y capacitivo, con el objetivo de estudiar los efectos producidos durante la conexión y desconexión de este tipo de cargas a un bus de 270 V<sub>DC</sub>, ver Figura 5.22

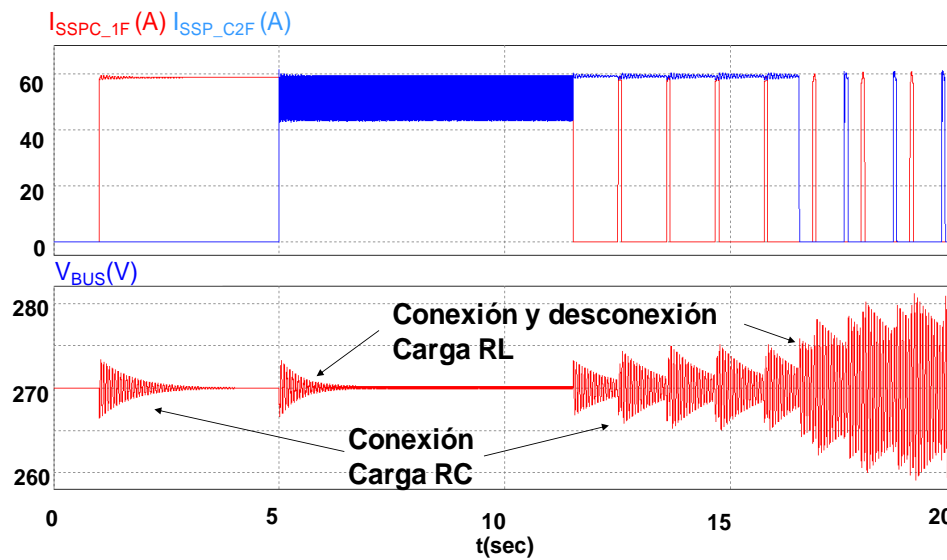


**Figura 5.22: Comparativa en la conmutación entre carga capacitiva y resistiva durante el ON/OFF del SSPC**

En la Figura 5.22 se comparan los efectos producidos durante la conexión y desconexión de una carga con carácter capacitivo (SSPC\_1E) y una carga resistiva (SSPC\_2E). Con este modelo de SSPC es fácil evaluar los tiempos de subida y bajada de la tensión y la corriente, hasta alcanzar su estado estacionario, durante la conexión y desconexión de las cargas resistivas y capacitivas.

Además, mediante el análisis de la Figura 5.22, se puede detectar efectos no deseados, como es la aparición de una corriente negativa por el SSPC\_1E, cuando se conectan cargas capacitivas al bus de 270 V<sub>DC</sub>.

Finalmente en la Figura 5.23, se muestra los efectos de la conexión de cargas de carácter capacitivo (SSPC\_1F) y la desconexión de cargas de carácter inductivo (SSPC\_2F), sobre un bus principal de distribución. Estos transitorios incrementan el rizado en el bus de distribución de 270 V<sub>DC</sub>.



**Figura 5.23. Tensión en el Bus durante la conexión y desconexión de cargas inductivas y capacitivas.**

Se puede apreciar como aparecen niveles visibles de rizado, que son introducidos en este bus, cuando se producen repetitivas conexiones y desconexiones de las cargas a través de los SSPC, ver Figura 5.23. Este rizado puede provocar serios problemas de inestabilidad en el bus. Con este modelo de SSPC es posible predecir futuros problemas de estabilidad durante las conexiones y desconexiones de los SSPC, si se simula el dispositivo modelado con el resto de componentes que forman parte del sistema de distribución de potencia y la carga aguas abajo del componente.

## 5.4 Modelado Comportamental

Como se ha visto en los apartados anteriores, los modelos estructurales requieren de grandes tiempos de simulación a la hora de reproducir el comportamiento de los SDPE, y pueden presentar problemas de convergencia. Además, debido a la falta de información, por temas de confidencialidad, no es posible conocer el diseño interno de los dispositivos. Por lo tanto, es necesario desarrollar modelos comportamentales, que no se basen en la estructura interna de los SSPC y que además permitan reducir el tiempo de simulación de los grandes SDPE.

El modelo comportamental del SSPC propuesto, es un modelo discreto en el tiempo que se basa en cuatro grandes bloques, los cuales son independientes de la estructura interna del SSPC, ver Figura 5.24:

- un bloque que fija la corriente en régimen permanente o estado estacionario (Bloque A),
- un bloque de encendido o apagado ON/OFF (Bloque B),
- un bloque de protección contra sobrecorriente y curva  $I^2t$  (Bloque C),
- Bloque semiconductor (Bloque D), que modela el componente del semiconductor principal.

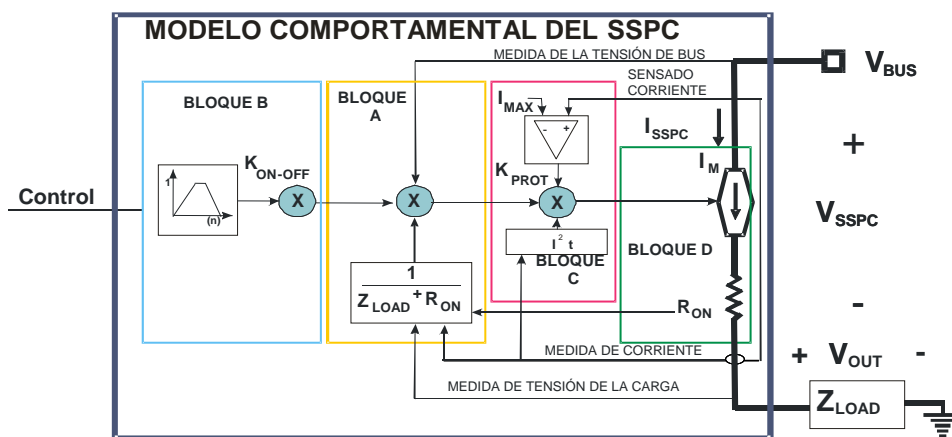


Figura 5.24: Diagrama del modelo comportamental del SSPC

El modelo comportamental al igual que el modelo estructural ha sido implementado en la herramienta de simulación PSIM [PSIM]. El modelo discreto del SSPC está basado en una fuente dependiente de corriente ( $I_M$ ) controlada en tensión, la cual tiene en cuenta las diferentes condiciones operativas del SSPC durante: la conexión de la carga, el estado estacionario y la desconexión de la carga. El diagrama del bloque de la Figura 5.24 se implemento, en el modelo comportamental del SSPC, mediante el circuito representado en la Figura 5.25.

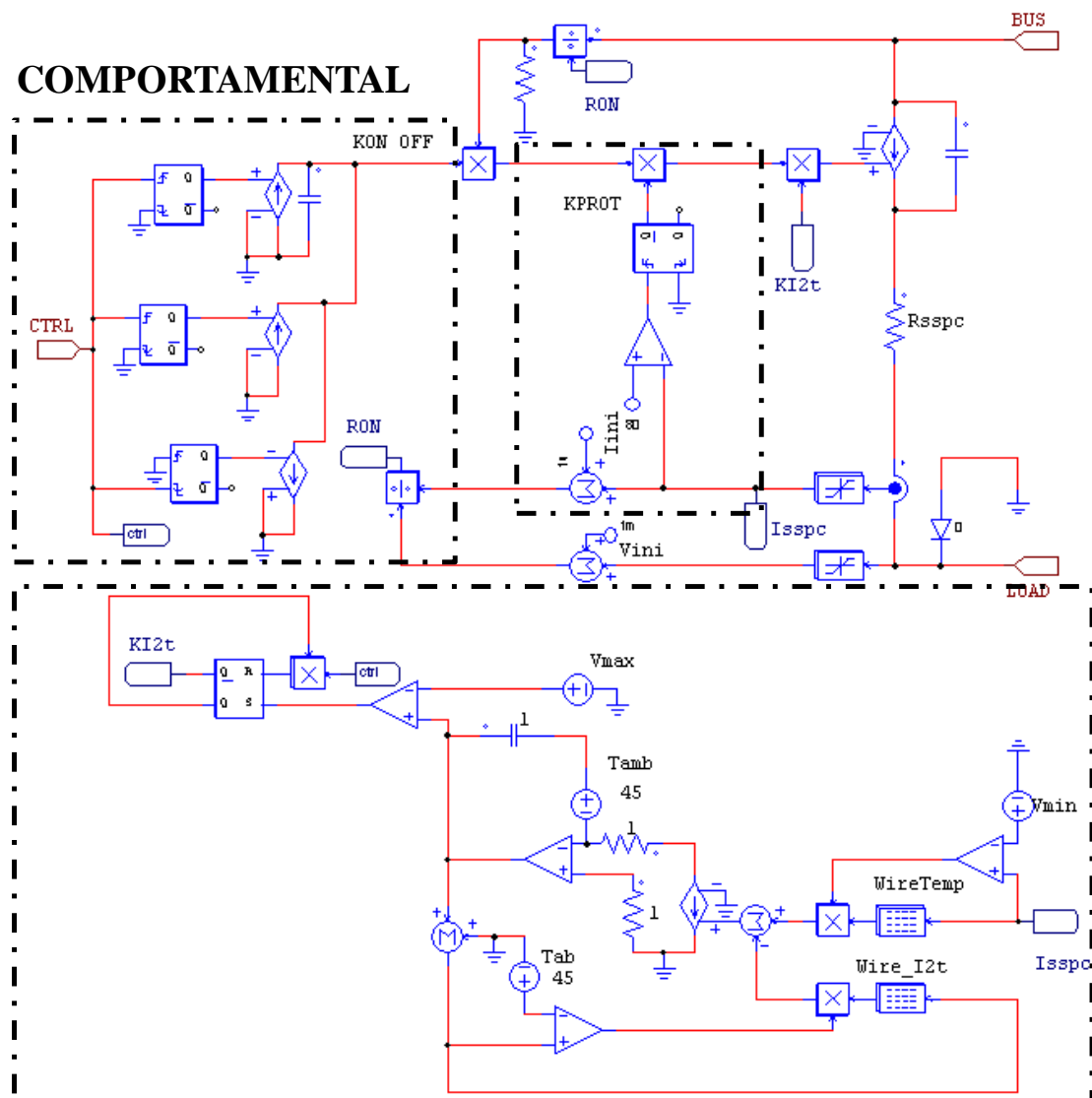


Figura 5.25: Esquema del circuito del modelo comportamental del SSPC

Los parámetros necesarios para implementar el modelo de SSPC están definidos por las hojas de características de los distintos fabricantes, incluidos en el apartado de validación experimental 5.6 (Corriente nominal, corriente máxima, tiempo de conexión, tiempo de desconexión y resistencia en conducción) [RP-21415] [SPDP10D].

#### 5.4.1 Modelado del estado estacionario (Bloque A)

Durante el funcionamiento en régimen permanente, la corriente por la fuente dependiente,  $I_{SSPC}$ , tiene en cuenta la tensión nominal del bus al cual está conectada, así como la tensión y corriente en la carga que está conectada por medio del SSPC. Durante el estado estacionario de funcionamiento, la corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ) en el instante ( $n$ ), depende de la tensión de bus ( $V_{BUS}$ ) y la carga conectada ( $Z_{LOAD}$ ) en el instante anterior ( $n-1$ ), así como del valor de la resistencia de conducción ( $R_{ON}$ ). El valor de  $I_{SSPC}$  puede ser calculado de acuerdo a:

$$I_{SSPC_n} = \frac{V_{BUS_{n-1}}}{R_{ON} + Z_{LOAD_{n-1}}} \quad (5.5)$$

Donde el valor de  $Z_{LOAD}$  en cualquier instante se obtiene a partir de la expresión:

$$Z_{LOAD_{n-1}} = \frac{V_{OUT_{n-1}}}{I_{SSPC_{n-1}}} \quad (5.6)$$

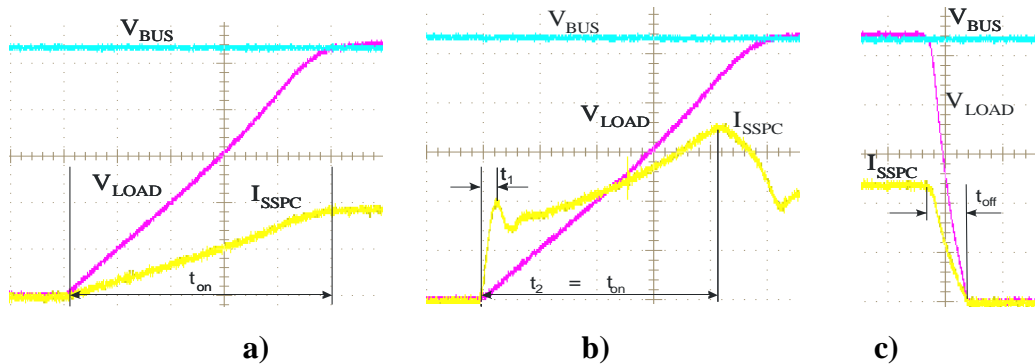
siendo  $V_{OUT}$  la tensión de la carga.

Considerando las dos expresiones anteriores, la medida de la tensión y corriente por la carga y la tensión de bus son necesarias para el desarrollo del modelo, como se puede apreciar en la Figura 5.24.

#### 5.4.2 Modelado de las conmutaciones (Bloque B)

Durante la conexión de una carga mediante un SSPC, la corriente puede ser controlada por el procesador interno del SSPC o, por el contrario, la corriente por el SSPC puede no estar controlada, dependiendo del fabricante del dispositivo electrónico. No obstante, del estudio de los SSPC disponibles en el mercado, la evolución de la corriente se puede

aproximar a una o varias rampas, ver Figura 5.26.a y Figura 5.26.b. La evolución de la corriente  $I_{SSPC}$  durante el proceso de conmutación está condicionada por la variación de la tensión en la carga, como se puede apreciar en la Figura 5.26. También, durante el apagado, la respuesta de la corriente por el SSPC también puede ser aproximada a una rampa, ver Figura 5.26.c.



**Figura 5.26: Medida del SSPC durante la conexión de (a) una carga resistiva (b) una carga resistiva-capacitiva y (c) la desconexión de una carga resistiva**

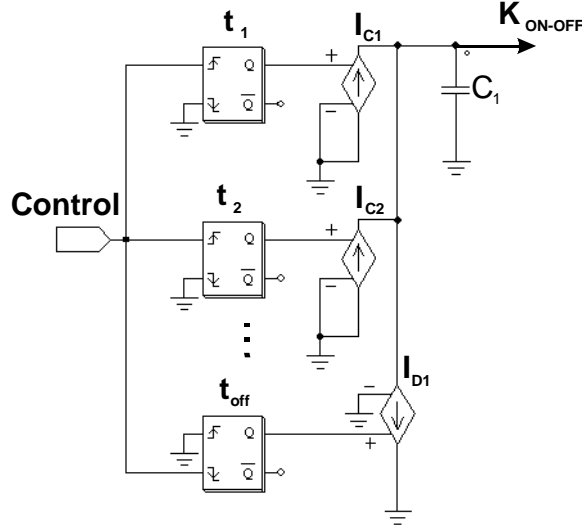
Por lo tanto durante las conmutaciones, el comportamiento de la corriente por el SSPC puede ser modelado mediante una variable, que se ha denominado  $K_{ON-OFF}$ . Esta variable está incluida dentro del bloque de conmutación de la siguiente forma:

- Durante el tiempo de conexión ( $t_{on}$ ),  $K_{ON-OFF}$  se incrementa desde 0 hasta 1.
- Durante el estado estacionario  $K_{ON-OFF}$  se mantiene igual a 1.
- Durante el tiempo de apagado ( $t_{off}$ )  $K_{ON-OFF}$  disminuye su valor desde 1 hasta 0.

Los mencionados tiempos de conexión y desconexión ( $t_{on}$  and  $t_{off}$ ) son obtenidos a partir de las hojas de características de los fabricantes.

De este modo, este bloque puede ser fácilmente modelado para su simulación por medio de condensadores internos y fuentes de corriente dependientes ( $I_{C1}$ ,  $I_{C2}$  y el  $I_{D1}$ ), ver Figura 5.27. También puede ser descrito mediante ecuaciones analíticas como se detalla en los siguientes párrafos. Así pues, los parámetros para una fuente de corriente ( $I_{C1}$ ) ó dos fuentes de corriente ( $I_{C1}$  e  $I_{C2}$ ) serán incluidos en el modelo dependiendo de la

tecnología del SSPC. Esto permite modelar la evolución del SSPC durante el encendido con una o varias rampas. Estas fuentes de corriente se encargan de cargar o descargar el condensador  $C_1$ , con el fin de generar rampas durante los intervalos de conmutación.



**Figura 5.27: Bloque de conmutación ON/OFF a partir de monoestables.**

El tiempo de carga del condensador es controlado por medio de uno o dos monoestables. Por lo tanto,  $K_{ON-OFF}$  durante la conexión viene definido para una rampa por la ecuación:

$$K_{ON-OFF_n} = \frac{I_C}{C} \cdot t_{n-1} \quad \text{para} \quad t_{n-1} \leq t_{on} \quad (5.7)$$

O en el caso de varias rampas viene definido por la expresión:

$$K_{ON-OFF_n} = \frac{1}{C} \cdot \sum_1^i I_{C_i} \cdot t_{n-1_i} \quad \text{para} \quad t_{n-1_i} \leq t_{on} \quad (5.8)$$

Con el fin de generar la pendiente durante el apagado, una fuente de corriente ( $I_{D1}$ ) descarga el condensador  $C_1$  y provoca que el SSPC se apague en un período de tiempo igual a  $t_{off}$ , el cual está controlado por un monoestable. Durante este periodo,  $K_{ON-OFF}$  viene definido por la expresión:

$$K_{ON-OFF_n} = 1 - \frac{I_{D1}}{C_1} \cdot t_{n-1} \quad \text{para} \quad t_{n-1} \leq t_{off} \quad (5.9)$$



A partir de las expresiones (5.8) y (5.9), es posible definir la señal  $K_{ON-OFF}$  como:

$$K_{ON-OFF_n} = \begin{cases} 0 \leq \frac{1}{C} \cdot \sum_1^i I_{C_i} \cdot t_{n-1_i} \leq 1 & \text{para } t_{n-1_i} \leq t_{on} & \text{Conexión} \\ 1 & & \text{Estacionario} \\ 1 \geq 1 - \frac{I_{D1}}{C_1} \cdot t_{n-1} \geq 0 & \text{para } t_{n-1} \leq t_{off} & \text{Desconexión} \end{cases} \quad (5.10)$$

### 5.4.3 Modelado de la protección contra sobrecorriente y la curva $I^2t$ (Bloque C)

El bloque de protección contra sobrecorriente evita que la corriente  $I_{SSPC}$  supere el máximo valor permitido ( $I_{SSPC} > I_{MAX}$ ). Este bloque de protección contra sobrecorriente se aplica por medio de una comparación que establece el valor de la variable  $K_{PROT}$  (1 para el funcionamiento normal y 0 para las condiciones de sobrecarga), ver Figura 5.24. Además, la curva  $I^2t$  es fácilmente integrable a partir de las hojas de características del fabricante.

Para modelar la condición de sobrecarga continua y la activación de la curva  $I^2t$ , se ha introducido otro circuito electrónico, ver Figura 5.28. Por medio de este bloque, el SSPC puede ser configurado con el objetivo de ser desconectado a diferentes umbrales de corriente y con tiempos de desconexión diferentes, de acuerdo con la curva  $I^2t$ , proporcionada por el fabricante del dispositivo.

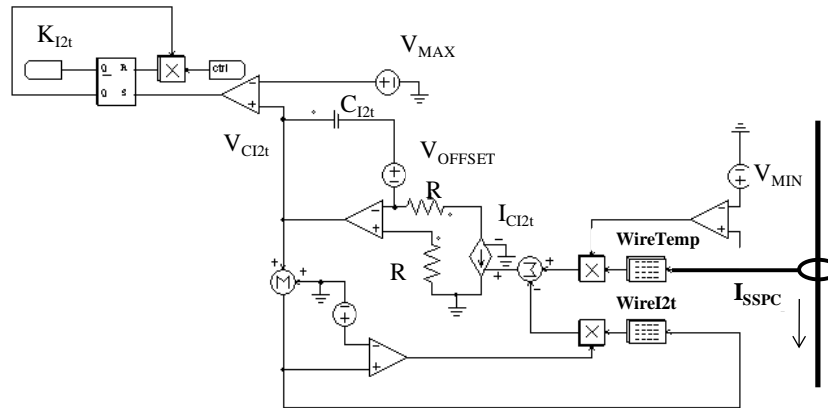


Figura 5.28. Circuito comportamental de la curva  $I^2t$

Este circuito está constituido mediante una tabla indexada, que ha sido obtenida a partir de las hojas de características de los fabricantes. La tensión en  $V_{CI2t}$  representa la evolución de la temperatura del cable dentro del SSPC dependiendo del nivel de corriente que atraviesa el SSPC,  $I_{SSPC}$ . La corriente medida por el SSPC es el parámetro de entrada a la tabla de búsqueda indexada (*wire- $I^2t$* ), esta tabla proporciona el valor al generador de corriente dependiente  $I_{CI2t}$ , el cual carga al condensador ( $C_{I2t}$ ), de forma que se sigue el comportamiento de la curva  $I^2t$ . Además, la segunda tabla (*Wire-Temp*) proporciona una realimentación negativa al generador de corriente,  $I_{CI2t}$ ; este valor es proporcional a la disipación producida en el cable. Estas tablas de búsqueda se han generado de igual forma que en el modelo estructural y están descritas en el epígrafe 5.3.5.1. De este modo, la expresión de la tensión en el condensador se puede expresar como:

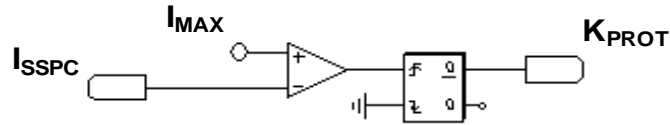
$$\Delta V_{CI2t_n} = \frac{I_{CI2t_{n-1}}}{C_{I2t}} \cdot \Delta t_n \quad (5.11)$$

Donde  $\Delta t_n$  es el intervalo de tiempo que se aplica la corriente de carga al condensador ( $C_{I2t}$ ).

Por lo tanto, cuando la corriente por el SSPC sobrepasa un valor determinado ( $I_{SSPC} > 110\%$ ) se produce un incremento de la tensión en el condensador  $V_{CI2t}$ , que representa la  $T^a$  del cable.

Cuando la tensión en el condensador alcanza un valor igual a un valor máximo prefijado, el cual representa la temperatura máxima ( $V_{MAX}$ ) de acuerdo con la curva  $I^2t$ , la señal  $K_{I2t}$  es puesta a 0 y como consecuencia se apaga el SSPC por medio del driver. Es importante señalar que la curva  $I^2t$  puede ser modelada mediante ecuaciones en lugar de los circuitos electrónicos propuestos.

Por otro lado, este bloque incorpora un sistema de reconexión que actúa cuando se produce la activación por sobrecorriente, de forma que el SSPC conecta nuevamente la carga transcurrido un tiempo definido en el modelo, ver Figura 5.29.



**Figura 5.29. Detalle del circuito de reconexión en el modelo de SSPC**

#### 5.4.4 Modelado del bloque del semiconductor (Bloque D)

Este bloque está basado en una fuente de corriente dependiente controlada en tensión, ver Figura 5.24. El valor de la tensión está condicionado por los parámetros internos del modelo de SSPC:  $K_{PROT}$ ,  $K_{ON-OFF}$  y  $K_{I2t}$ , los cuales han sido definidos en cada uno de los apartados anteriores, mediante sus correspondientes expresiones matemáticas.

Además, esta tensión de control de la fuente dependiente es proporcional a los valores de las tensiones y corrientes externas que soporta el SSPC, en el instante anterior:  $I_{SSPC}$ ,  $V_{BUS}$  y  $V_{OUT}$ .

Con estos parámetros de entrada y conociendo la resistencia serie,  $R_{ON}$ , se puede calcular el valor de la fuente de corriente dependiente a partir de la siguiente expresión:

$$I_{SSPC_n} = \frac{I_{SSPC_{n-1}} \cdot V_{BUS_{n-1}}}{I_{SSPC_{n-1}} \cdot R_{ON} + V_{OUT_{n-1}}} \cdot K_{ON-OFF_{(n-1)}} \cdot K_{PROT_{(n-1)}} \cdot K_{I^2 t_{(n-1)}} \quad (5.12)$$

## 5.5 Comparativa de los modelos

Una vez simulados los dos tipos de modelos, en la Tabla 5.1 se muestra una comparación entre las principales características de ambos modelos de SSPC: estructural y comportamental. Estos datos se han obtenido a partir de las diferentes simulaciones en un banco de pruebas virtual con similares escenarios y número de componentes.

PARÁMETROS	ESTRUCTURAL	COMPORTAMENTAL
Tiempo de Simulación	✗	✓
Modelo Configurable diferentes fabricantes	✗	✓
Exportable a otras plataformas	✗	✓
Detección de problemas de integración	✗	✓
Detección de problemas durante el diseño	✓	✗
Simulación de grandes SDPE	✗	✓
Comportamiento del SSPC	✓	✓
Información requerida	✗	✓

**Tabla 5.1 Comparativa entre modelos comportamentales y modelos estructurales**

De acuerdo con la Tabla 5.1, los modelos comportamentales tienen más ventajas que los modelos estructurales en relación con el tiempo de simulación de grandes SDPE y la generalidad del modelo. No obstante, durante los procesos de diseño es necesario emplear modelos estructurales basados en la arquitectura real del componente, con el objetivo de realizar las mejoras oportunas y facilitar la detección de errores al diseñador. Sin embargo, dada la complejidad de los modelos, estos requieren de tiempos de simulación muy largos.

Las principales ventajas del modelo comportamental son su robustez desde el punto de vista de su simulación y a nivel de integración con otros modelos de componentes eléctricos/electrónicos, y los tiempos requeridos de simulación que permiten hacer un gran número de simulaciones en tiempos pequeños, en comparación con el modelo estructural del SSPC. Otro punto que cabe destacar es la facilidad a la hora de exportar el modelo comportamental a otras plataformas como MATLAB, si se compara con el modelo estructural de mayor complejidad. Aunque no permiten realizar análisis detallados durante la fase de diseño del componente.

Los resultados experimentales del modelo estructural se incluirán en el capítulo sexto, una vez presentado el diseño del prototipo del SSPC realizado durante la tesis doctoral. Los resultados experimentales y la validación del modelado de este capítulo se han centrado en el modelo comportamental de dos SSPC comerciales.

## 5.6 Validación experimental del modelo comportamental del SSPC

Con el objetivo de validar la respuesta del modelo comportamental genérico del SSPC, se han configurado dos modelos de SSPC, de acuerdo a las mediciones experimentales y las hojas de características de dos fabricantes DDC y Sensitron [RP-21415] [SPDP10D], componentes a los cuales se ha podido tener acceso, ver Tabla 5.2.

Número de fabricante	(DDC) RP21415D2-600	(Sensitron) SPDP10D270
Corriente Nominal	$I_N = 15 \text{ A}$	$I_N = 10 \text{ A}$
Corriente Máxima	$I_{MAX} = 45 \text{ A}$	$I_{MAX} = 80 \text{ A}$
Tiempo de Conexión	400 $\mu\text{s}$	2000 $\mu\text{s}$
Tiempo de Desconexión	40 $\mu\text{s}$	200 $\mu\text{s}$
$R_{ON}$	0,083 $\Omega$	0,027 $\Omega$

**Tabla 5.2: Características Eléctricas de los SSPC**

En el banco real de pruebas se han caracterizado y medido los diferentes componentes pasivos (impedancia de carga y cables) mediante un analizador de impedancia [HP4194A]. Este analizador ha proporcionado modelos eléctricos equivalentes, que se han utilizado junto con los modelos comportamentales de SSPC (DDC y Sensitron), en un banco virtual de pruebas similar al presentado en el epígrafe 5.3.

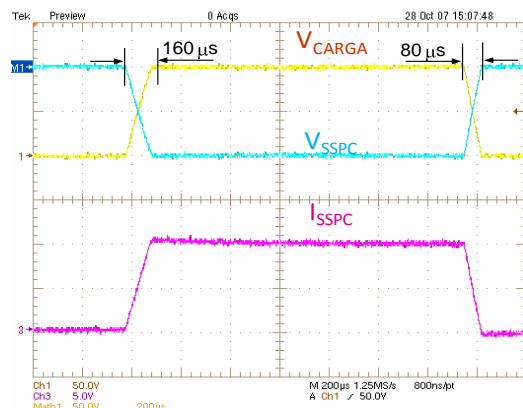
Los SSPC reales han sido testados en el banco real de pruebas con cargas resistivas y capacitivas, y con diferentes niveles de tensión de 270 V<sub>CC</sub> y de 100 V<sub>CC</sub>, ver Figura 5.30. En todos los resultados experimentales y de simulación, se han representado la tensión de la carga y la tensión del SSPC (gráfico superior) y la corriente por el SSPC (gráfico inferior).



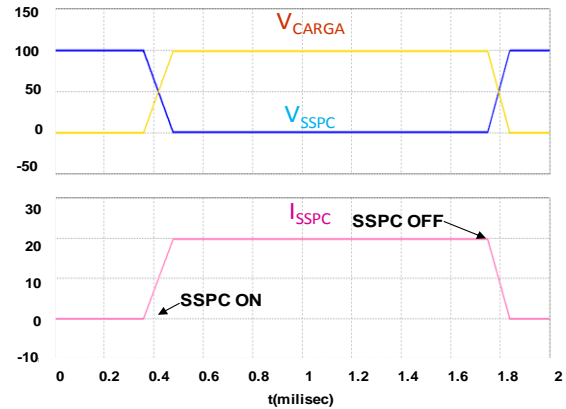
**Figura 5.30: Banco de ensayos HVDC en EADS**

### 5.6.1 Validación dinámica del modelo del SSPC

La Figura 5.31 muestra el comportamiento real del SSPC fabricado por DDC, durante la conexión y desconexión de una carga resistiva ( $10\ \Omega$ ) a una tensión de bus de distribución de  $100\ V_{CC}$ .



**Figura 5.31: Corriente y tensión medidas durante ON/OFF, con carga resistiva. SSPC fabricado por DDC. Canal 1: Tensión en la carga. Canal 3: Corriente por el SSPC. Canal M: Tensión en el SSPC**

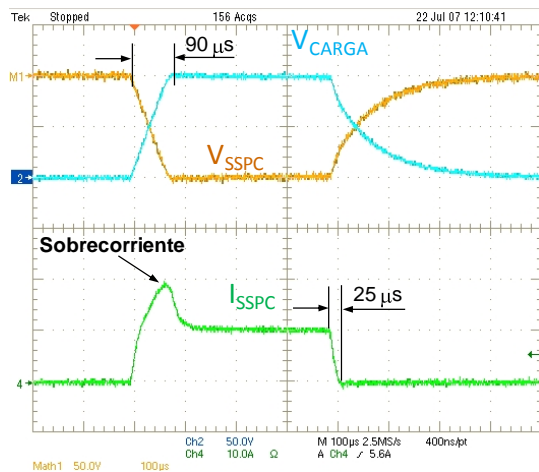


**Figura 5.32: Tensión y corriente simulada durante el ON/OFF, con carga resistiva. Modelo comportamental para el SSPC de DDC**

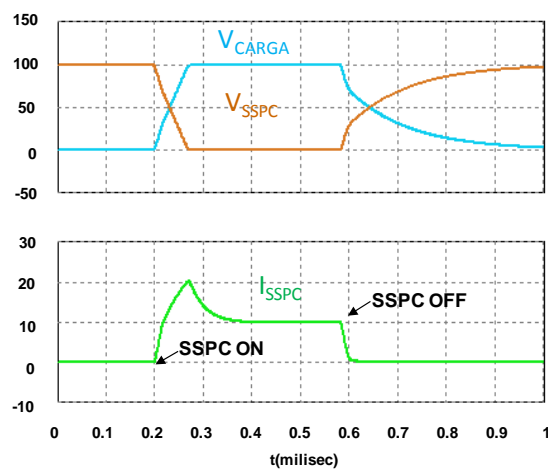
Su modelo comportamental se ha configurado de acuerdo con el funcionamiento experimental representado en la Figura 5.31 y la hoja de características del fabricante DDC [RP-21415].

La Figura 5.32 muestra los resultados de la simulación con el modelo generado de SSPC, para el mismo circuito que ha sido previamente probado en un banco real de pruebas. Se puede comprobar cómo las dos formas de onda, simuladas y medidas presentan la misma evolución durante la conmutación ON y OFF.

La Figura 5.33 muestra los resultados experimentales durante la conexión y desconexión de un SSPC con una carga de carácter capacitivo ( $10\ \Omega$  y  $10\ \mu\text{F}$ ), a un bus de continua con una tensión de  $100\ \text{V}_{\text{CC}}$ . La Figura 5.34 muestra el comportamiento del mismo modelo del SSPC de DDC, empleado para la primera prueba, Figura 5.32, pero en este caso, durante la conexión y desconexión de la carga de carácter capacitivo ( $10\ \Omega$  y  $10\ \mu\text{F}$ ) a la tensión de bus de distribución de  $100\ \text{V}_{\text{CC}}$ .



**Figura 5.33: Corriente y tensión medidas durante ON/OFF, con carga capacitiva. SSPC fabricado por DDC. Canal 2: Tensión en la carga. Canal 4: Corriente por el SSPC. Canal M: Tensión en el SSPC**



**Figura 5.34: Tensión y corriente simulada durante el ON/OFF, con carga capacitiva. Modelo comportamental para el SSPC de DDC**

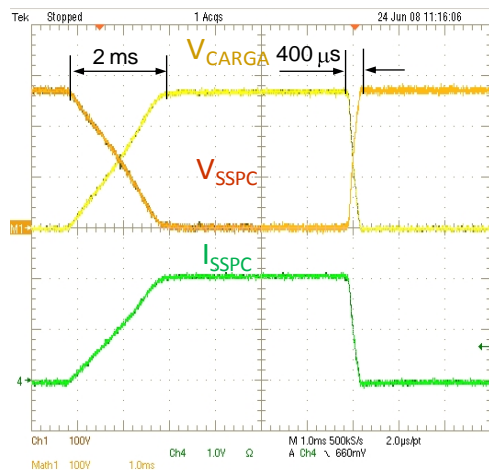
Es importante señalar que los resultados de la simulación, durante la conexión y desconexión de la carga, presentados en la Figura 5.34, se han obtenido con el mismo modelo el cual ha sido configurado a partir de la configuración de la carga resistiva y las hojas de características del fabricante. Se puede observar cómo en ambos casos, las corrientes ( $I_{\text{SSPC}}$ ) tienen un comportamiento muy similar y prácticamente el mismo valor



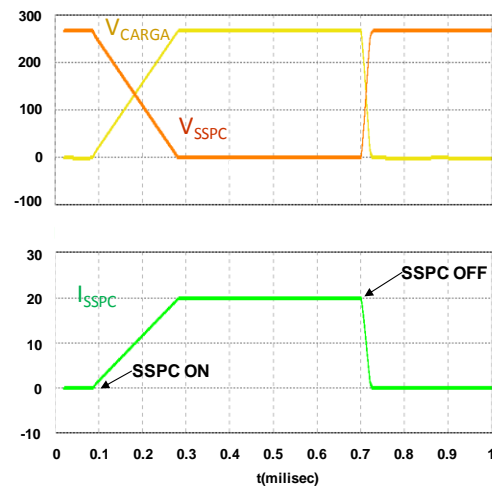
máximo igual a 20 A. También, las medidas experimentales y simuladas de las tensiones son muy similares durante la conmutación en el encendido y el apagado del SSPC.

La Figura 5.35 muestra el comportamiento real del SSPC fabricado por Sensitron, durante la conexión y desconexión de una carga resistiva ( $27\ \Omega$ ) a un bus principal de distribución de  $270\ V_{CC}$ . El segundo modelo comportamental se ha configurado de acuerdo a la Figura 5.35 y las hojas de características del fabricante Sensitron [SPDP10D].

En la Figura 5.36 se muestran los resultados de la simulación durante la conexión y desconexión del modelo comportamental que conecta una carga resistiva ( $27\ \Omega$ ) a un bus de tensión de  $270\ V_{CC}$ .



**Figura 5.35: Corriente y tensión medidas durante ON/OFF, con carga resistiva. SSPC fabricado por Sensitron. Canal 1: Tensión en la carga. Canal 4: Corriente por el SSPC. Canal M: Tensión en el SSPC**

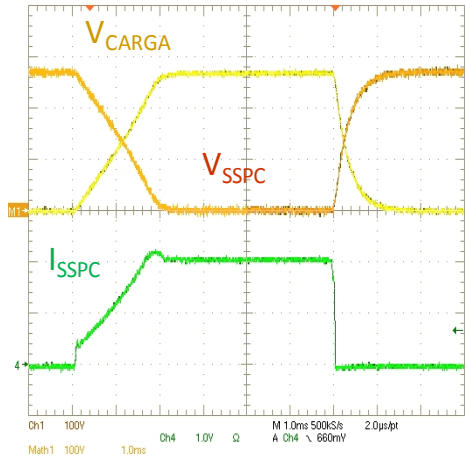


**Figura 5.36: Tensión y corriente simulada durante el ON/OFF, con carga resistiva. Modelo comportamental para el SSPC de Sensitron**

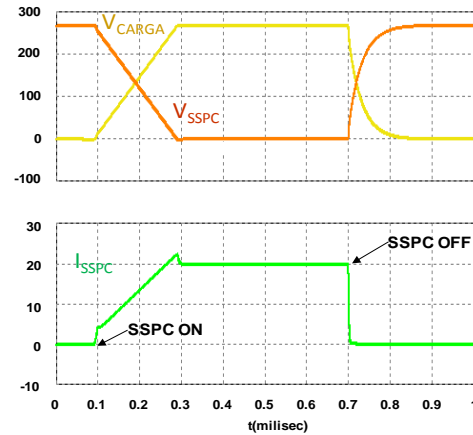
La Figura 5.37 muestra los resultados experimentales, durante la conexión y desconexión, de una carga capacitiva ( $27\ \Omega$  y  $12\ \mu F$ ) a un bus de tensión de  $270\ V_{CC}$  mediante el SSPC fabricado por Sensitron.

En la Figura 5.38 se muestran los resultados de la simulación para el modelo comportamental del SSPC de Sensitron, durante la conexión y desconexión de la misma

carga resistiva y capacitiva. Es importante señalar, en este caso, que aparecen dos pendientes diferentes en la forma de onda de la corriente durante conexión de carga capacitiva, estas rampas son reproducidas por el modelo del SSPC, perfectamente.



**Figura 5.37: Corriente y tensión medidas durante ON/OFF, con carga capacitiva. SSPC fabricado por Sensitron. Canal 1: Tensión en la carga. Canal 4: Corriente por el SSPC. Canal M: Tensión en el SSPC**



**Figura 5.38: Tensión y corriente simulada durante el ON/OFF, con carga capacitiva. Modelo comportamental para el SSPC de Sensitron**

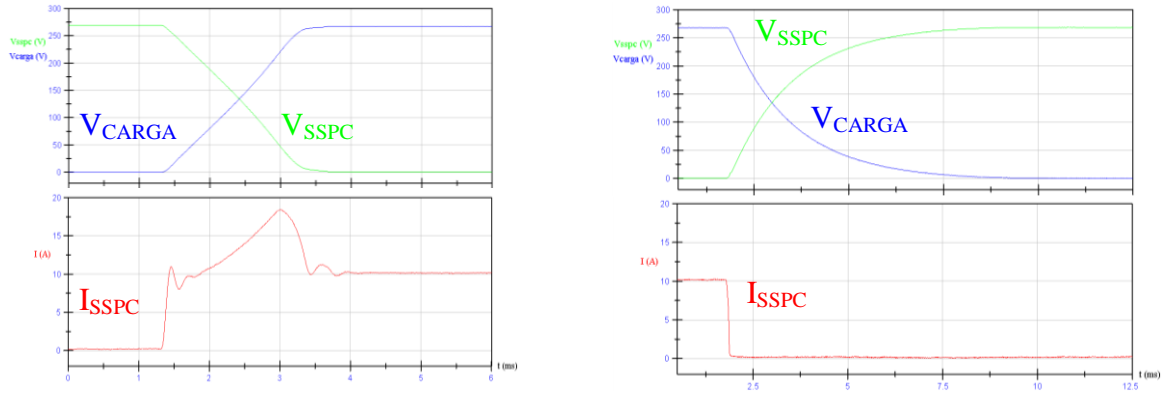
De los datos presentados, se puede concluir que el modelo comportamental del SSPC es fácilmente aplicable a las diferentes tecnologías de SSPC, con diferentes tipos de cargas (resistiva y capacitiva) y diferentes niveles de tensión de bus (270 V<sub>CC</sub> o 100 V<sub>CC</sub>).

#### 5.6.1.1 Validación del modelo de Sensitron incluido en un modulo de 8 SSPC

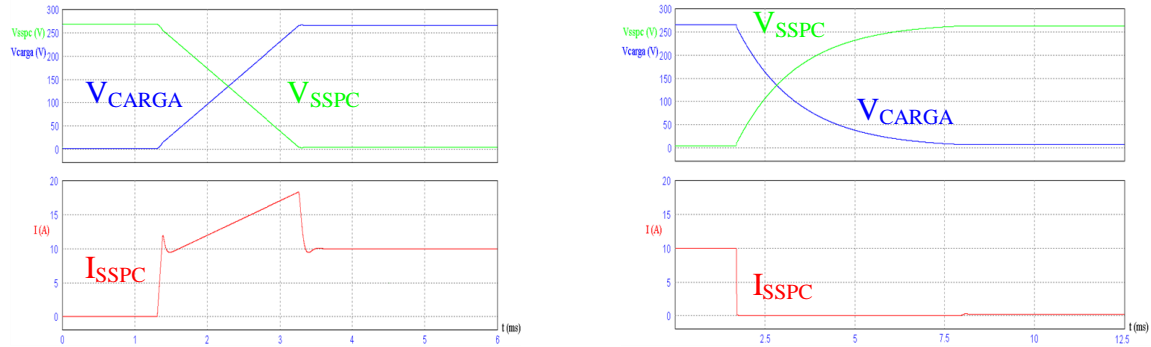
Una vez validado el modelo de SSPC a nivel de componente, se validará el modelo del SSPC de Sensitron cuando se encuentra integrado en un modulo de varios SSPC. Durante las medidas se han utilizado diferentes condensadores y una carga resistiva fija, además al igual que los casos anteriores se han tenido en cuenta las impedancias de los cables del sistema de distribución, el cual se han incluido en el modelado del banco virtual.

Para la recogida de medidas experimentales se ha utilizado el sistema de adquisición del banco HVDC, basado en la herramienta Dyadem ©.

En la Figura 5.39 y la Figura 5.40 se muestran los resultados experimentales y de simulación, durante la conexión y desconexión de un SSPC incluido dentro de un modulo de SSPC, con carga capacitiva ( $27\ \Omega$  y  $62\ \mu\text{F}$ ) que se conecta a un bus de tensión de  $270\ \text{V}_{\text{CC}}$ . Es importante señalar que este modelo es el mismo con el que se ha realizado las simulaciones del epígrafe anterior. Como se puede apreciar, los niveles de corriente máximos alcanzados,  $17\ \text{A}$ , son similares en la simulación y los datos experimentales.



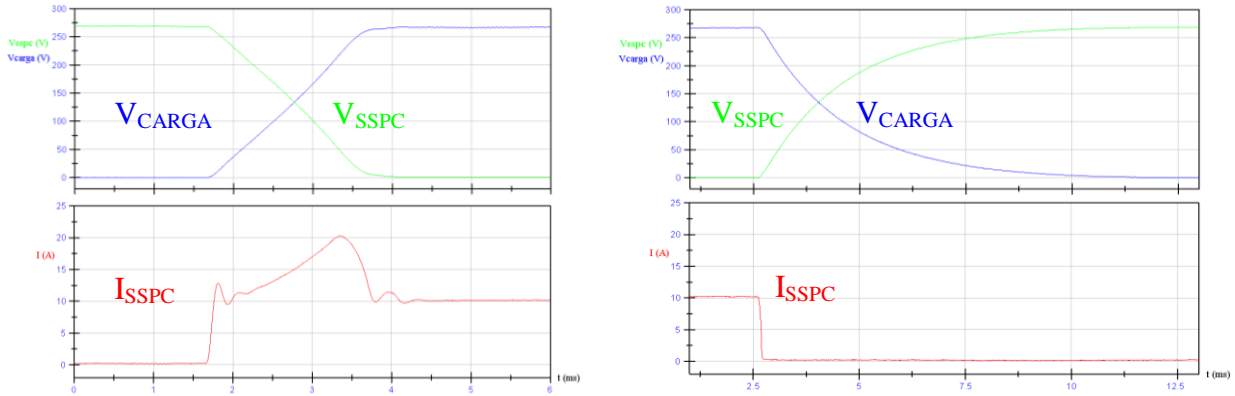
**Figura 5.39: Tensión y corriente medidas durante el encendido y el apagado, con carga capacitiva ( $27\ \Omega$  y  $62\ \mu\text{F}$ ). SSPC de Sensitron**



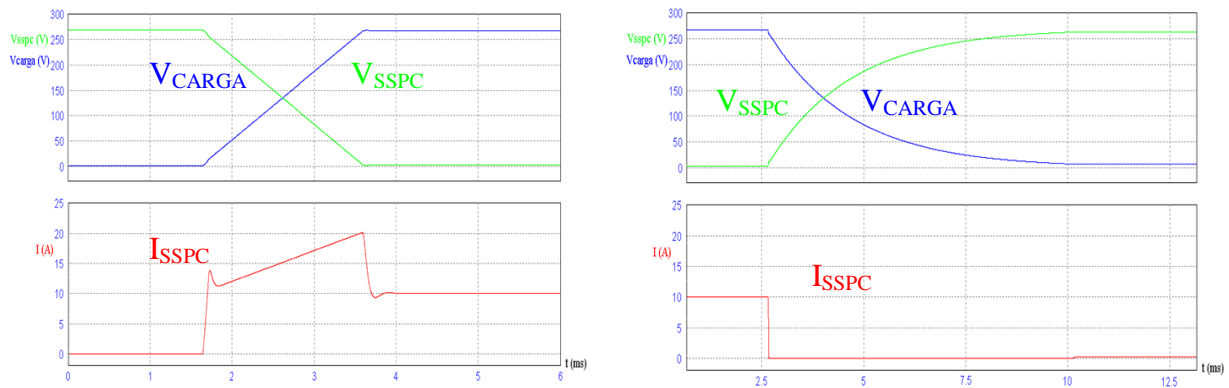
**Figura 5.40: Tensión y corriente simuladas durante el encendido y el apagado, con carga capacitiva ( $27\ \Omega$  y  $62\ \mu\text{F}$ ). SSPC de Sensitron**

En la Figura 5.41 y la Figura 5.42 se muestran los resultados de la simulación, durante la conexión y desconexión de un SSPC incluido dentro de un modulo de SSPC, con carga capacitiva ( $27\ \Omega$  y  $75\ \mu\text{F}$ ) que se conecta a un bus de tensión de  $270\ \text{V}_{\text{CC}}$ , mediante el

mismo modelo comportamental de SSPC. Como se puede apreciar, los tiempos de conexión y evolución son similares en la simulación y en los datos experimentales.



**Figura 5.41: Tensión y corriente medidas durante el encendido y el apagado con carga capacitiva ( $27\ \Omega$  y  $75\ \mu\text{F}$ ). SSPC de Sensitron**



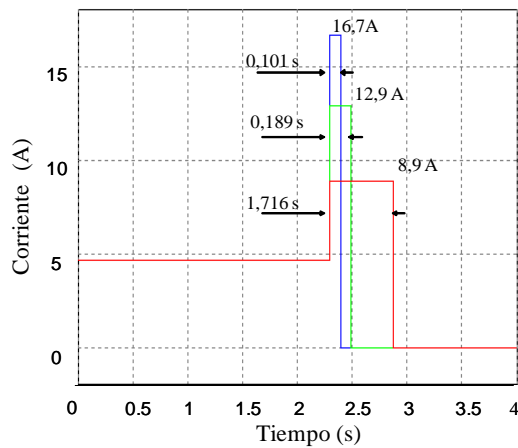
**Figura 5.42: Tensión y corriente simuladas durante el encendido y el apagado, con carga capacitiva ( $27\ \Omega$  y  $75\ \mu\text{F}$ ). SSPC de Sensitron**

Además, para esta segunda carga capacitiva de  $75\ \mu\text{F}$ , se observa que los niveles máximos de corriente, 20 A, se obtienen tanto en los resultados experimentales como en la simulación.

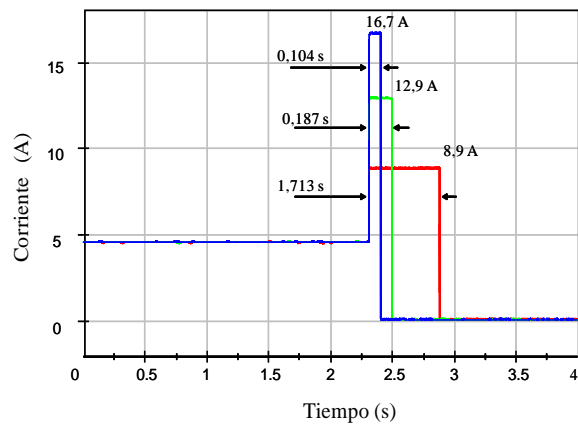
De los resultados experimentales se puede deducir que los resultados obtenidos mediante la simulación del modelo de Sensitron coinciden con el comportamiento de un SSPC real incluido dentro de un SDPE.

### 5.6.2 Validación del modelo de la curva $I^2t$

Con el objetivo de validar la curva  $I^2t$ , se han probado dos SSPC de diferentes fabricantes, DDC y Sensitron, con diferentes niveles de corriente, por encima de la corriente nominal. Los tiempos de activación de la protección del SSPC real se han medido y comparado con los resultados obtenidos mediante el modelo comportamental implementado en la herramienta de simulación PSIM.



**Figura 5.43: Corriente simulada por el SSPC durante la activación de la protección  $I^2t$ . Modelo comportamental del SSPC de DDC**

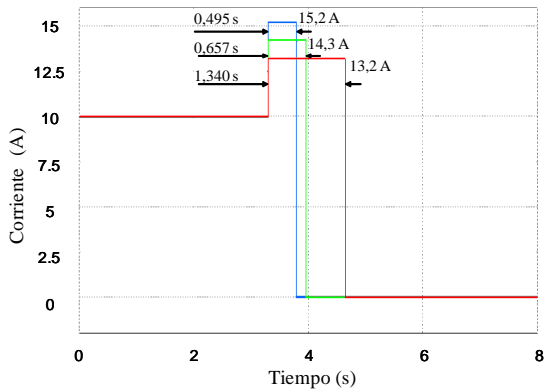


**Figura 5.44: Medida real de la corriente por el SSPC durante la activación de la protección  $I^2t$ . SSPC fabricado por DDC**

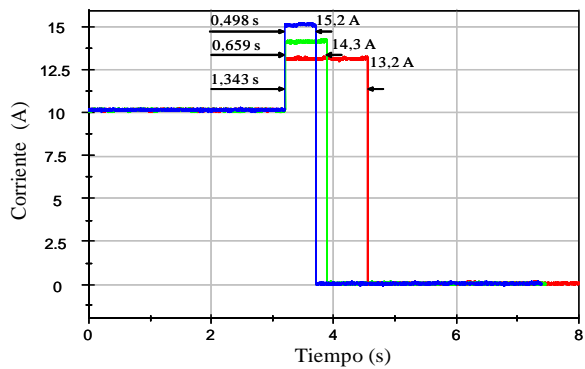
En la Figura 5.43 se muestran los resultados de la simulación del modelo comportamental del SSPC de DDC, con diferentes niveles de corriente por encima de la nominal y los tiempos de desconexión del SSPC. Por otro lado, la Figura 5.44, muestra los resultados experimentales con el SSPC real fabricado por DDC, para los mismos niveles de sobrecorriente simulados con PSIM.

Además, las mismas simulaciones se han realizado con un segundo SSPC. De este modo, la Figura 5.45 muestra los resultados de la simulación del modelo comportamental del SSPC de Sensitron, con diferentes niveles de sobrecorriente por encima de la nominal y cuando se produce la desconexión del SSPC. En la Figura 5.46, se muestran los

resultados experimentales con el SSPC real fabricado por Sensitron, para los mismos niveles de sobrecorriente simulados con PSIM.



**Figura 5.45:** Corriente simulada por el SSPC durante la activación de la protección  $I^2t$ . Modelo comportamental del SSPC de Sensitron



**Figura 5.46:** Medida real de la corriente por el SSPC durante la activación de la protección  $I^2t$ . SSPC fabricado por Sensitron

Comparando las figuras anteriores, con los resultados de activación de la protección  $I^2t$  de cada uno de los fabricantes, se puede observar como el modelo se ajusta al comportamiento de los SSPC reales de forma muy precisa.

## 5.7 Conclusiones

En este capítulo 5 se ha abordado el modelado estructural y comportamental de los SSPC. En primer lugar, se ha realizado un **modelo estructural**, el cual incluye los diferentes bloques que componen un SSPC. Este tipo de modelo ha permitido detectar problemas durante la fase de diseño del prototipo del SSPC, como es la conexión de cargas altamente capacitivas, para ello:

- Se ha generado un modelo del MOSFET incluido en el SSPC, en la herramienta de simulación PSIM, que reproduce las diferentes zonas de funcionamiento (corte, activa y saturación), a partir de su componente homólogo en el programa de simulación Pspice.
- Además, se ha introducido el concepto de la curva  $I^2t$  con memoria térmica que evoluciona de acuerdo con las características del cable al cual protege, y además tiene en cuenta el efecto de la disipación térmica del cable.
- Por otro lado, se ha comparado el modelo de la curva de protección  $I^2t$  clásica, con la curva  $I^2t$  compensada por la disipación térmica del cable. De esta comparativa, se puede concluir que los efectos introducidos por la disipación del cable pueden afectar a los tiempos de activación de la protección por sobrecorriente y tiempos de reconexión de las cargas.

En segundo lugar, se ha desarrollado, un **modelo comportamental** para su aplicación en la simulación de grandes SDPE, que es independiente de la estructura interna del SSPC:

- Esto permite aplicarlo a diferentes fabricantes sin necesidad de conocer la estructura interna del componente.
- Este modelo se ha validado experimentalmente con dos SSPC comerciales desde el punto de vista dinámico durante la conexión de cargas resistivas y capacitivas.
- Se ha validado la funcionalidad del modelo de la curva de protección  $I^2t$ .

De la comparación de los modelos estructurales y comportamentales se puede concluir, que los modelos comportamentales tienen más ventajas que los modelos estructurales en relación con el tiempo de simulación de grandes SDPE y en la generalidad del modelo. No obstante, durante los procesos de diseño es necesario emplear modelos estructurales, con el objetivo de facilitar al diseñador la detección de futuros problemas.



## 5.8 Referencias

- [Barrado08] A. Barrado, D. Izquierdo, C. Raga, M. Sanz, A. Lázaro. “SSPC Model with Variable Reset Time, Environmental Temperature Compensation and Thermal Memory Effect”. Applied Power Electronics Conference and Exposition 2008. APEC '08. 23rd Annual, 24-28 February 2008. Page(s): 1716-1721.
- [Barrado09] A. Barrado, D. Izquierdo, M. Sanz, C. Raga, A. Lázaro. “Behavioral Modeling of Solid State Power Controllers (SSPC) for Distributed Power Systems”. Applied Power Electronics Conference and Exposition 2008. APEC '09. 24th Annual, 16-19 February 2009.
- [HP4194A] HP4194A Impedance/Gain-Phase Analyzer Operation Manual, Yokogawa-Hewlett-Packard Co., Ltd., Tokyo, Japan, 1987.
- [Izquierdo08] D. Izquierdo, A. Barrado, C. Raga, M. Sanz, P. Zumel, A. Lázaro. “Protection devices for aircraft electrical power distribution systems: a Survey” Industrial Electronics Society, 2008. IECON 2008. 35th Annual Conference of IEEE. Orlando November 11-13, 2008.
- [Izquierdo09] D. Izquierdo, A. Barrado, M. Sanz, C. Fernández, P. Zumel “Modeling Methods for Solid State Power Controllers (SSPC)”; Compatibility and Power Electronics. 6th International Conference-Workshop, CPE'09, May 20-22, 2009.
- [Izquierdo10] D. Izquierdo, R. Azcona, F. J. López del Cerro, C. Fernández, B. Delicado. “Electrical Power Distribution System (HV270DC), for Application in More Electric Aircraft”. Applied Power Electronics Conference and Exposition 2010. APEC '09. 25th Annual, 20-23 February 2010.
- [Krihely10] Krihely, N. and Ben-Yaakov, S.; “Modeling and Evaluation of Diode Reverse Recovery in Discrete-Transition Simulators”. Second IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) on September 12-16, 2010.
- [KwaSur94] Kwa-Sur T.; Lifeng Y. and Dravid, N., “Modeling the Protection System Components of the Space Station Electric Power System”. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on Volume 30, Issue 3, July 1994: 800-808.

- [Leach] Leach International. Solid State Power Controller 270 VDC, 7.5 A. Engineering Data Sheet. Web available: <http://www.leachintl.com>
- [Mathcad] MathCAD © version 11, Mathsoft Engineering & Education, Inc.
- [National] NATIONAL HYBRID INC. SERIES 90000–28&270-VDC, @10 & 20 A-Datasheet. Web available: <http://www.nationalhybrid.com/index.php>
- [OrCAD] OrCAD PSpice A/D Reference Manual; Version 9.0, October, 1998. Copyright 1998, OrCAD, Inc. Web available: [http://www.elec.ucl.ac.be/enseignement/ELEC2000/pages/pspice/spice\\_reference.pdf](http://www.elec.ucl.ac.be/enseignement/ELEC2000/pages/pspice/spice_reference.pdf)
- [Panov96] Panov, Y. V. and Lee, F. C., “Modeling and Stability Analysis of a DC Powersystem with Solid State Power Controllers”, Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1996. APEC '96. Conference Proceedings 1996, Eleventh Annual, Volume: 2, March 3-7, 1996: 685-691, Feb 1996.
- [PSIM] PSIM® Professional Version; Copyright Powersim Inc. Web available: <http://www.powersimtech.com/>
- [SAE99] “Wiring Aerospace Vehicle”. SAE AS50881, SAE 1999.
- [RP-21415] RP-21415D2-600. “Remote Solid-State Power Controllers”. DDC Data Device Corporation, 2006. Web available: <http://www.ddc-web.com>
- [RD160] “Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment”. RTCA/DO-160E, RTCA Inc. December 9, 2004.
- [SPDP10D] SPDP10D270. Technical Data Datasheet, Rev-A. Sensitron Semiconductor. Web available: <http://www.sensitron.com>
- [Tam95] K. S. Tam, "Functional Models for Space Power Electronics Circuits", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 31, n° 1, 1995, págs 288-296.
- [Valdivia09] V. Valdivia, A. Barrado, A. Lazaro, P. Zumel, C. Raga, “Easy Modeling and Identification Procedure for “Black Box” Behavioral Models of Power Electronics Converters with Reduced Order Based on Transient Response Analysis”, in Proc. of IEEE Appl. Power Electron. Conf. APEC '09, 15-19 Feb. 2009.

# Capítulo 6

## **6. RESULTADOS EXPERIMENTALES**



ÍNDICE CAPÍTULO 6

6.1	INTRODUCCIÓN .....	249
6.2	ESTRUCTURA DEL PROTOTIPO DE SSPC DESARROLLADO.....	251
6.2.1	<i>Semiconductor de Potencia [Bloque 1]</i> .....	253
6.2.2	<i>Driver y circuitos de control activo/pasivo del semiconductor [Bloque 2]</i> .....	253
6.2.2.1	Regulación lineal de la tensión en el condensador Cg.....	254
6.2.2.2	Regulación conmutada de la tensión en el condensador Cg.....	255
6.2.3	<i>Bloque de alimentación interno del SSPC [Bloque 3]</i> .....	256
6.2.4	<i>Bloque de medida de la tensión en la carga [Bloque 4]</i> .....	257
6.2.5	<i>Bloque de la medida de la corriente por el SSPC [Bloque 5]</i> .....	258
6.2.6	<i>Bloque interfaces y control del SSPC [Bloque 6]</i> .....	259
6.2.7	<i>Aislamiento optoelectrónico</i> .....	260
6.3	RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS ESTRATEGIAS DE CONEXIÓN .....	261
6.3.1	<i>Resultados experimentales del control pasivo</i> .....	261
6.3.2	<i>Resultados experimentales del control activo con derivada constante de la corriente</i> .....	267
6.3.2.1	Mediante la regulación lineal de la tensión en el condensador Cg .....	268
6.3.2.2	Mediante la regulación conmutada de la tensión del condensador Cg .....	270
6.3.3	<i>Resultados experimentales del control activo con corriente constante</i> .....	276
6.3.4	<i>Resultados experimentales del control activo generalizado</i> .....	283
6.3.5	<i>Resultados experimentales del control activo por trayectoria óptima de la corriente</i> .....	289
6.4	RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA ACTIVACIÓN DE LAS PROTECCIONES .....	295
6.4.1	<i>Validación experimental de la curva <math>I^2t</math></i> .....	295
6.4.1.1	Validación de la curva $I^2t$ clásica mediante sobrecorriente constante .....	296
6.4.1.2	Validación de la memoria térmica en la curva $I^2t$ .....	298
6.4.1.3	Validación del efecto de disipación térmica en los cables en la curva $I^2t$ .....	299
6.4.2	<i>Protección contra sobrecorriente 480% de la corriente nominal</i> .....	300

6.5	MODELADO ESTRUCTURAL DEL PROTOTIPO .....	302
6.5.1	<i>Modelado del control pasivo</i> .....	303
6.5.2	<i>Modelado del control activo con corriente constante</i> .....	306
6.5.3	<i>Modelado del control activo con derivada constante de la corriente</i> .....	309
6.5.4	<i>Modelado del control activo generalizado</i> .....	311
6.5.5	<i>Modelado del control activo por trayectoria óptima de la corriente</i> .....	313
6.6	MODELADO COMPORTAMENTAL DEL PROTOTIPO .....	316
6.6.1	<i>Modelado comportamental del control activo con corriente constante</i> .....	317
6.6.2	<i>Modelado del control activo con derivada constante de la corriente</i> .....	318
6.6.3	<i>Modelado del control activo generalizado</i> .....	320
6.7	RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL SSPC IMPLEMENTADO CON DIFERENTE TECNOLOGÍA DE SEMICONDUCTOR: MOSFET VS IGBT .....	322
6.8	CONCLUSIONES .....	325
6.9	REFERENCIAS .....	327

## 6.1 Introducción

Una vez analizados los diferentes problemas a los cuales se enfrenta el SSPC, a la hora de conectar cargas capacitivas, y cómo se pueden solucionar mediante estrategias activas de control de la corriente por el dispositivo. En el capítulo 6 se presenta el diseño de un prototipo de SSPC, que será utilizado para validar, en primer lugar, los cálculos teóricos del capítulo 4, y en segundo lugar, el modelado presentado en el capítulo 5. Es importante señalar que únicamente, se presentan los resultados obtenidos con el prototipo final, el cual incluye toda la funcionalidad y ciertas mejoras en comparación con el primer prototipo realizado, ver Anexo B.

Los principales temas abordados en este capítulo 6 se pueden resumir en los siguientes párrafos:

- Se presenta la arquitectura interna y la descripción de cada uno de los bloques que componen el prototipo de SSPC desarrollado. El cual ha sido utilizado durante las diferentes pruebas y ensayos de validación experimental.
- Se muestran los resultados experimentales obtenidos con las diferentes estrategias de conexión de cargas altamente capacitivas presentadas en el capítulo 4: control pasivo, control activo con corriente constante, control activo con derivada constante de la corriente, control activo generalizado y control activo de la trayectoria óptima de la corriente.
- Se valida el funcionamiento del SSPC desde el punto de vista de la curva  $I^2t$ , incluyendo el efecto del enfriamiento de cable y las protecciones instantáneas ante una sobrecorriente.
- Se validan los modelos del SSPC presentados en el capítulo 5, mediante el prototipo de SSPC diseñado, para las diferentes estrategias de conexión de cargas altamente capacitivas.

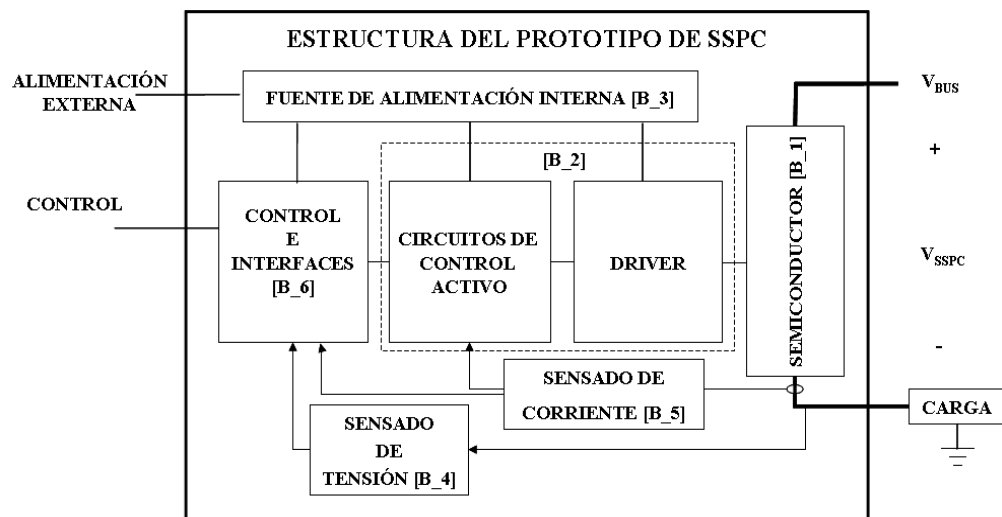
- Finalmente, se sustituye el MOSFET como semiconductor principal del SSPC por un IGBT, y se compara su funcionamiento frente a los resultados obtenidos a partir del dispositivo anterior.



## 6.2 Estructura del prototipo de SSPC desarrollado

El prototipo de SSPC diseñado ha sido utilizado para la verificación práctica de las propuestas teóricas, en relación con la conexión de cargas muy capacitivas, presentadas en el capítulo 4, y de los modelos presentados en el capítulo 5.

En este apartado se muestran las distintas partes de las que se compondrá el prototipo de SSPC que se ha desarrollado en el marco de esta tesis doctoral. En la Figura 6.1 se incluye un diagrama con los diferentes bloques que componen el prototipo de SSPC desarrollado.

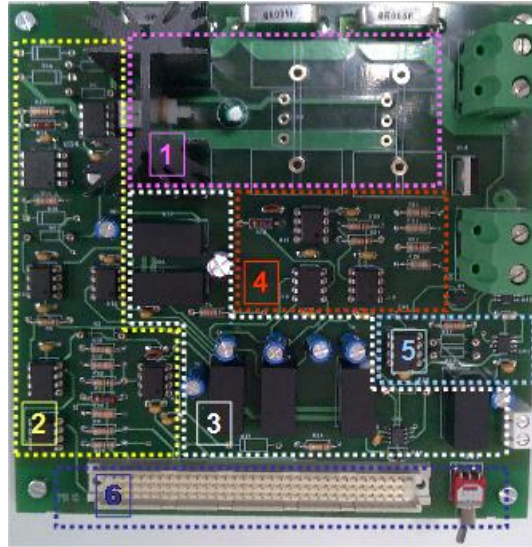


**Figura 6.1: Diagrama de bloques del prototipo de SSPC**

De acuerdo con el diagrama de bloques, el prototipo diseñado se puede dividir en los siguientes bloques:

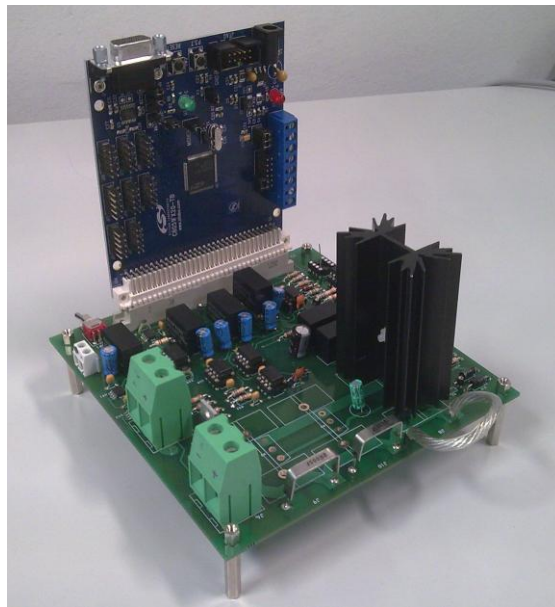
- Semiconductor [Bloque 1]
- Bloque del driver y los circuitos activos de control de corriente [Bloque 2]
- Sistema de alimentación interno del SSPC [Bloque 3]
- Bloque de medida de la tensión en la carga [Bloque 4]
- Bloque de medida de la corriente del SSPC [Bloque 5]
- Área de interface con la tarjeta de control [Bloque 6]

En la Figura 6.2 se han marcado sobre la placa base del SSPC, las zonas que corresponden con cada uno de los bloques anteriormente citados.



**Figura 6.2: Situación de los bloques en la placa base del prototipo de SSPC**

Sobre la placa base del prototipo de SSPC se inserta la tarjeta de control, ver Figura 6.3.



**Figura 6.3: Prototipo de SSPC desarrollado**

En los siguientes párrafos se describen los bloques que componen el prototipo de SSPC.

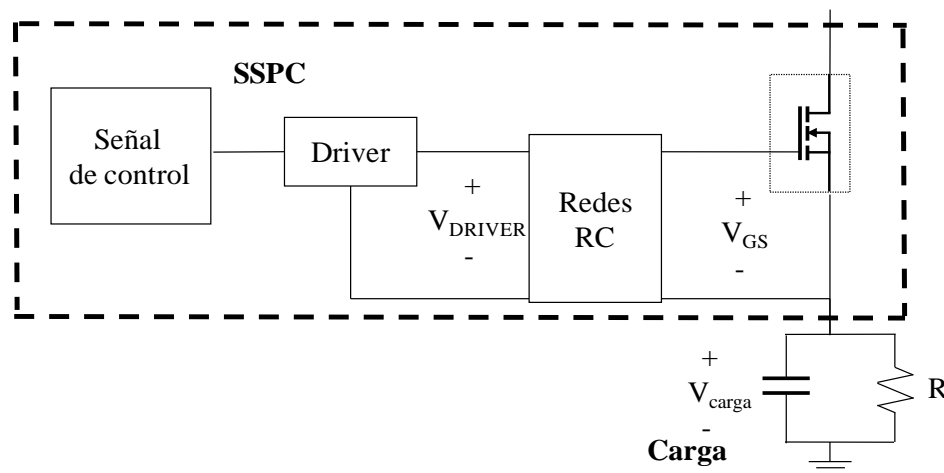
### 6.2.1 Semiconductor de Potencia [Bloque 1]

Los semiconductores necesarios para validar las especificaciones deben de cumplir ciertas características, de las cuales se pueden destacar:

- Tensiones de bloqueo mayores de 330 V, de acuerdo con las normas aplicables [MS704] [RD160].
- Corriente nominal mayor a 20 A.
- Muy bajas pérdidas en conducción.
- Buena disipación de potencia.

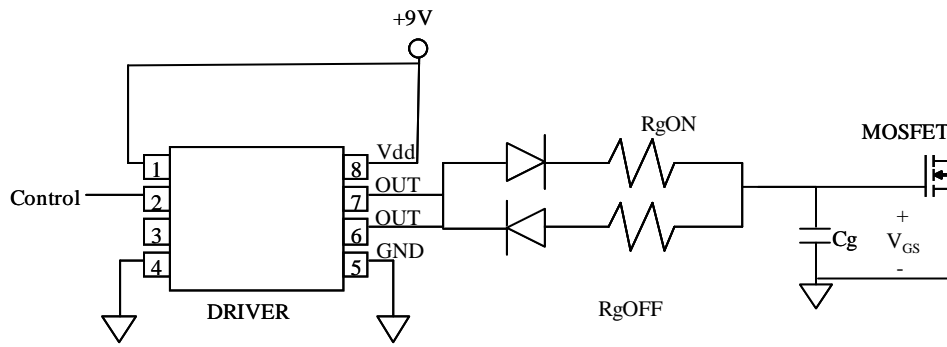
### 6.2.2 Driver y circuitos de control activo/pasivo del semiconductor [Bloque 2]

El objetivo del driver de control del SSPC es controlar la tensión entre puerta y fuente del MOSFET ó semiconductor utilizado, a partir de la señal de control, que puede ser generada para un control pasivo ó control activo dependiendo de la estrategia seleccionada, ver Figura 6.4.



**Figura 6.4: Circuito de control de la tensión  $V_{GS}$**

De este modo, cuando se activa la señal de control, el nivel de tensión de salida del driver es aplicado a una red de dos resistencias y un condensador, ver Figura 6.5, la cual regula la carga ó la descarga de  $C_g$ , y con ello la evolución de la tensión  $V_{GS}$ , controlando el nivel de corriente que circula por el MOSFET.



**Figura 6.5: Detalle del circuito de regulación de carga y descarga de  $C_g$**

Cuando la regulación de la tensión  $V_{GS}$  se realiza únicamente mediante estas redes RC, de forma no controlada, la estrategia de conexión se ha denominado control pasivo. Si por el contrario, la regulación de la tensión  $V_{GS}$ , se realiza mediante circuitos adicionales que actúen de forma controlada, la estrategia de conexión se ha designado como control activo.

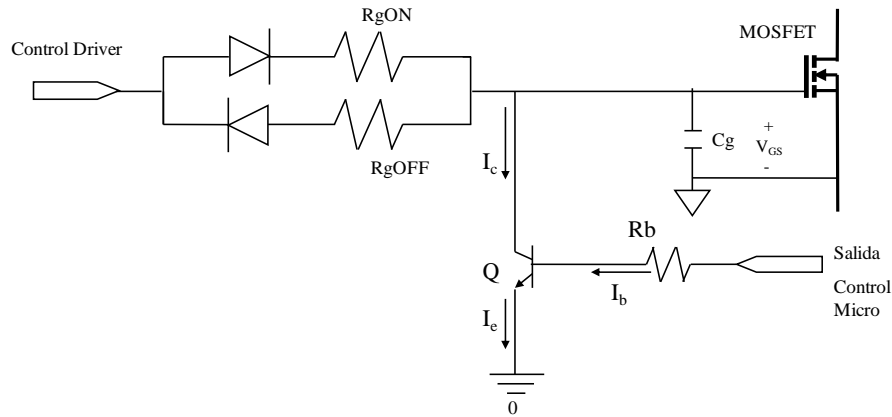
En el procedimiento por control pasivo, para lograr diferentes constantes de tiempo, durante el apagado y el encendido, se ha incluido un circuito formado por dos redes de diodos más resistencias ( $R_{gON}$  y  $R_{gOFF}$ ), cada una de las cuales limita la carga y la descarga del condensador  $C_g$ , respectivamente, ver Figura 6.5.

Para realizar el control activo de la corriente por el MOSFET se ha optado por aplicar dos circuitos electrónicos de control, los cuales se detallan en los siguientes epígrafes.

#### 6.2.2.1 Regulación lineal de la tensión en el condensador $C_g$

El primero de los circuitos de regulación de la tensión del condensador  $C_g$ , consiste en un transistor NPN que permite controlar la tensión  $V_{GS}$ , ver Figura 6.6.

Así pues, el microcontrolador compara internamente el nivel de corriente por el SSPC y aplica una señal proporcional en la base del transistor bipolar. El transistor bipolar realiza la descarga del condensador de forma lineal, proporcionalmente a la referencia impuesta por el microcontrolador. En este circuito la señal de control del driver solo cambia de estado, una única vez, al comienzo del transitorio de conexión.



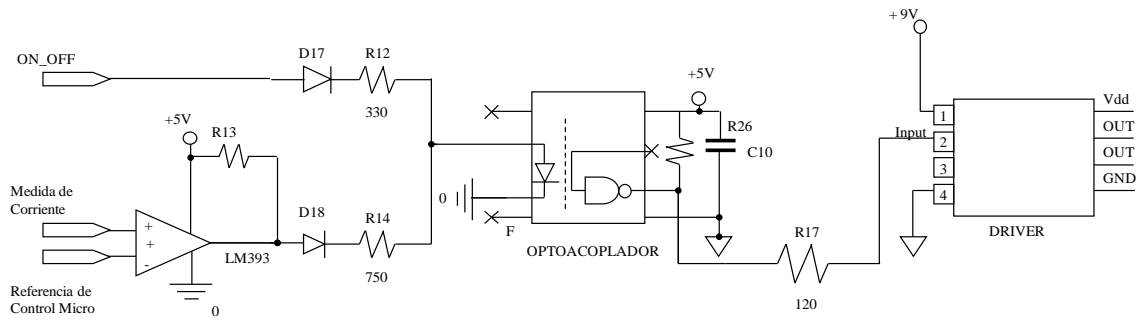
**Figura 6.6: Detalle del circuito de control mediante la regulación lineal de la tensión en  $C_g$**

Este método de regulación de la tensión en  $C_g$  presenta la problemática asociada a los tiempos de respuesta del microcontrolador y la influencia de los parámetros del transistor bipolar. Estos factores limitan de forma notable el control de la tensión de  $C_g$ , y por lo tanto el control de la corriente por el SSPC. Así pues, este método estaría aplicado a SSPC con tiempos de conexión grandes, o implementados mediante microcontroladores de altas prestaciones, y es necesario emplear otros métodos de control para cumplir con las especificaciones de conexión.

En cualquier caso, este bloque es necesario para la activación instantánea de la protección por sobrecorriente ante un nivel de corriente por encima de los máximos permitidos.

#### 6.2.2.2 Regulación conmutada de la tensión en el condensador $C_g$

El segundo de los circuitos de control activo funciona en combinación con el *driver* (MCP1407), el cual permite regular la tensión del condensador  $C_g$ , dependiendo del nivel de corriente que debe circular por el MOSFET. Así pues, los pulsos de disparo del driver (MCP1407) están regulados a partir de una señal de referencia generada por el microcontrolador y la medida de la corriente por el MOSFET. La señal de referencia es programable de acuerdo con los requisitos de corriente máxima, tiempo de conexión o área de operación segura del semiconductor. Para ello, se ha añadido un lazo de realimentación basado en un amplificador operacional (LM393) en configuración de comparador, ver Figura 6.7.

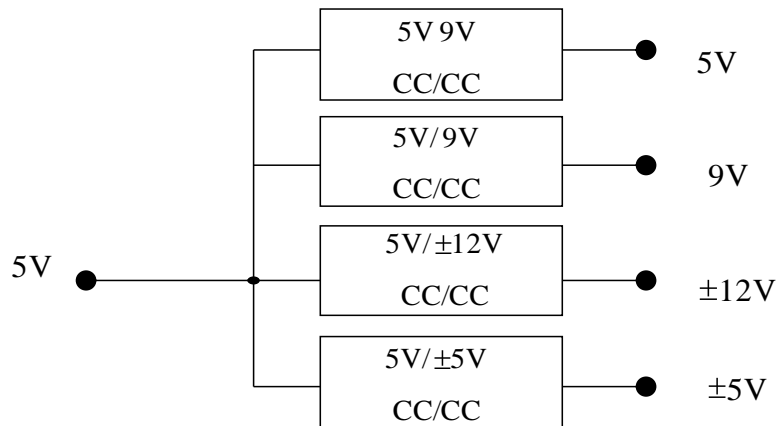


**Figura 6.7: Detalle del circuito de control mediante la regulación conmutada de la tensión en  $C_g$**

De este modo, el amplificador operacional compara el nivel de corriente medida en el SSPC, a partir del Bloque 5, con el nivel fijado por el microcontrolador ya sea una rampa ó un nivel constante. A partir de la comparación el amplificador operacional genera los pulsos de disparo necesarios durante el transitorio de conexión, de forma que regula la carga y descarga de la tensión del condensador  $C_g$  activamente, y de ese modo la corriente por el SSPC durante el transitorio de conexión de una carga altamente capacitiva. Además, se ha añadido una señal controlada por el microcontrolador que habilita o deshabilita la conexión del SSPC (ON\_OFF), ver Figura 6.7.

### 6.2.3 Bloque de alimentación interno del SSPC [Bloque 3]

Teniendo en cuenta las tensiones de funcionamiento del SSPC y que todos los circuitos internos deben estar aislados con respecto al bloque de potencia, es necesario tener un sistema de alimentación flotante que permita alimentar cada uno de los bloques a partir de una tensión fija externa. En este caso, se ha optado por 5 V como valor de referencia de la fuente externa, ver Figura 6.8.



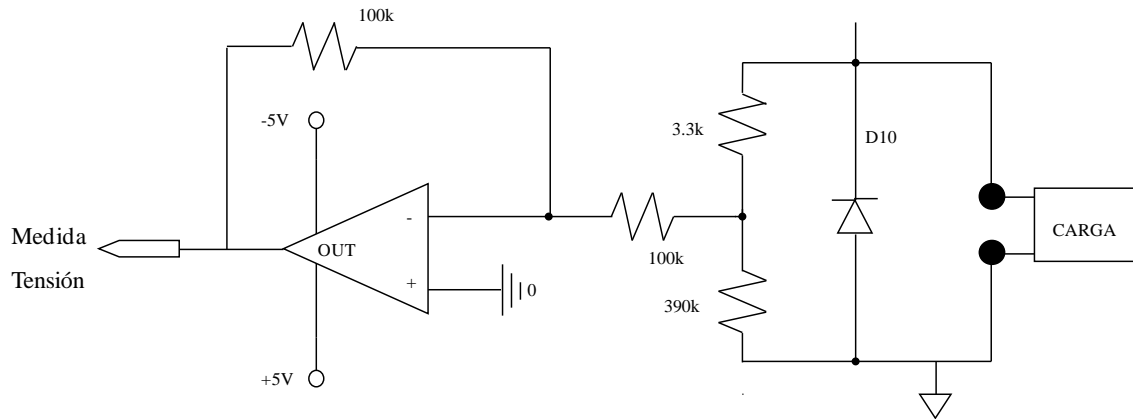
**Figura 6.8: Fuente de alimentación interna**

En el prototipo final se han seleccionado varios convertidores CC/CC, los cuales proporcionan diferentes tensiones de salida (5 V,  $\pm 5$  V, 9 V y  $\pm 12$  V) a partir de una fuente fija de laboratorio de 5 V. En un modulo de varios SSPC, dentro de un sistema embarcado, los 5 V serían proporcionados por la placa base donde se colocan cada uno de los SSPC que forman parte del sistema [Avionics05] [Leach] [Maxwell02].

#### 6.2.4 Bloque de medida de la tensión en la carga [Bloque 4]

Un cuarto bloque se encarga de medir la tensión que la carga soporta entre sus bornes, y así poder realizar el control activo por trayectoria óptima de la corriente. Esta medida se realiza mediante un divisor de tensión, referenciado a un nivel flotante de tensión en el borne positivo de la carga, y un amplificador operacional en configuración inversora, Figura 6.9, con el objetivo de conseguir una tensión positiva respecto a la tierra del circuito de control, previo al aislamiento mediante optoacopladores.

Debido a las tensiones de los convertidores analógicos digitales del microcontrolador elegido, el puente resistivo debe estar configurado para proporcionar un valor máximo de 3,3 V cuando la tensión en bornes de la carga sea la máxima admisible por el prototipo.



**Figura 6.9: Puente resistivo más un amplificador en configuración inversora**

El inversor que hay a continuación del puente resistivo, tiene dos resistencias de igual valor, las cuales fijan el valor de la ganancia en  $-1$ , de modo que se obtenga una señal positiva que pueda ser procesada por el microcontrolador.

### 6.2.5 Bloque de la medida de la corriente por el SSPC [Bloque 5]

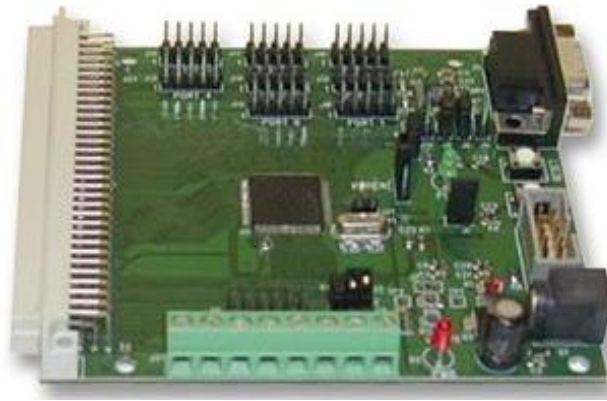
Existen diferentes procedimientos para medir la corriente que circula por el SSPC. Uno de los métodos utilizados en el primer prototipo fue el uso de sensores de efecto *hall*, que resultaron, para esta aplicación, ser lentos y en determinados rangos de la señal medida no lineales. Durante los instantes iniciales del transitorio de la conexión de cargas muy capacitivas es necesario tiempos de respuesta del orden de microsegundos, con lo cual se descarto esta tecnología para el prototipo final.

Así pues, en el prototipo final se ha implementado un circuito basado en una resistencia en serie con la carga, la cual permite medir la tensión entre sus bornes y de esta forma obtener un valor de tensión equivalente con la corriente que circula por el SSPC. Este circuito de medida de la corriente ha sido necesario aislarlo mediante un circuito optoacoplado, ver apartado 6.2.7, ya que la resistencia se encuentra con un nivel de referencia flotante que corresponde con la tensión del bus. Este procedimiento presenta caídas de tensión asumibles, ocupa un menor espacio y reduce los tiempos de adquisición.



### 6.2.6 Bloque interfaces y control del SSPC [Bloque 6]

El microprocesador es una de las piezas fundamentales en estos dispositivos y está encargado de controlar todos los parámetros del SSPC. En lugar de integrar el microcontrolador en la placa principal del SSPC, se ha seleccionado la tarjeta de desarrollo comercial C8051F120-DK, ver Figura 6.10, por las características funcionales que se detallan en los siguientes párrafos.



**Figura 6.10: Tarjeta de desarrollo encargada del control del SSPC, C8051F120DK**

La tarjeta seleccionada es un kit de desarrollo en el que el microcontrolador está integrado con todos los puertos conectados y de fácil acceso, y que además, permite pasar la programación desde un ordenador mediante un puerto JTAG de manera sencilla. Por otro lado, la placa de desarrollo incluye convertidores analógicos-digitales y digitales-analógicos, que facilitan el control del SSPC.

La placa C8051F120-DK se alimenta desde la placa principal del SSPC, a partir de 5 voltios aislados proporcionados por la fuente de alimentación interna del SSPC, de forma que la tierra del microcontrolador es común con el control de la placa del SSPC.

Las principales características de la tarjeta comercial que incluye el microcontrolador seleccionado, C8051F120-DK, son las siguientes:

- Memoria *Flash* de 128kB
- RAM de 256 bytes
- 5 Temporizadores programables de 16-bit

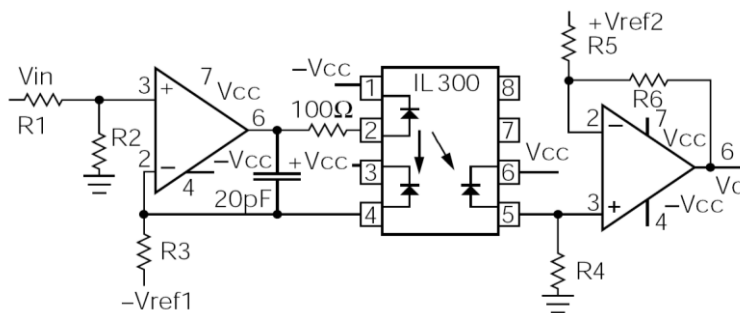
- 8 entradas ADC de 12-bit y 100 Ksps
- Dos salidas DAC, con una resolución de 12 bits

### 6.2.7 Aislamiento optoelectrónico

Es importante señalar, que en este tipo de componentes, el aislamiento entre la etapa de potencia y la zona de control es vital para el buen funcionamiento del dispositivo, y evitar que un fallo en la zona de potencia deteriore el microcontrolador y provoque un fallo crítico a nivel de componente y sistema.

A la hora del diseño del aislamiento, utilizado en las señales de medida de la corriente y la tensión, se han utilizado optoacopladores lineales que dan a la salida la misma señal que a la entrada para todo el rango de tensiones utilizado, ver Figura 6.11.

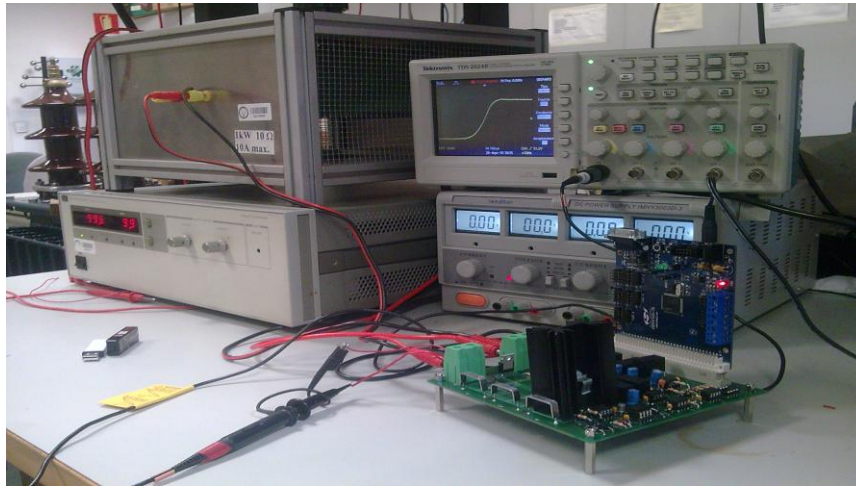
Los optoacopladores analógicos suelen ser lineales solo dentro de un rango muy pequeño, por ello la solución adoptada consiste en un optoacoplador con un emisor y dos detectores con la misma ganancia, de manera que a partir de un amplificador operacional con realimentación negativa, se consigue en ambos detectores la misma señal; pero una en el circuito de salida y otra en el circuito de entrada, y aisladas optoelectrónicamente, ver Figura 6.11.



**Figura 6.11: Esquema de un optoacoplador lineal con el IL300**

### 6.3 Resultados experimentales de las estrategias de conexión

Los ensayos han sido realizados en el laboratorio del Grupo de Sistemas de Electrónica de Potencia (GSEP) de la Universidad Carlos III de Madrid. Teniendo en cuenta la instrumentación y cargas disponibles en el laboratorio el valor de la tensión de bus con el que se validará el SSPC será de 50 V<sub>CC</sub> y 100 V<sub>CC</sub>. En la Figura 6.12 se muestra el banco de ensayos durante las pruebas del prototipo.



**Figura 6.12: Banco de ensayos del prototipo en el laboratorio del GSEP**

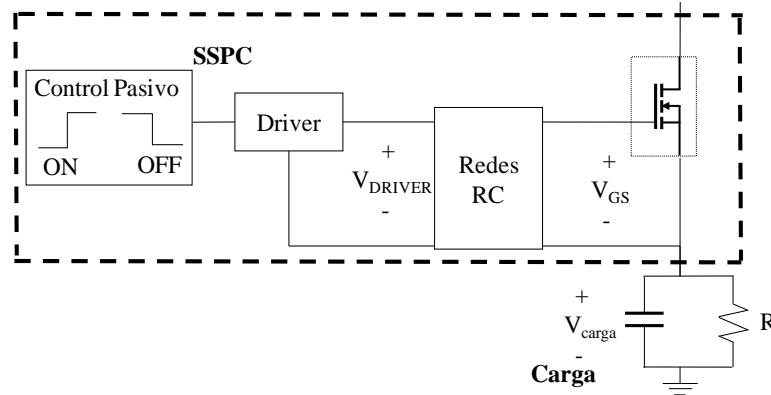
Antes de la realización de los ensayos con el prototipo de SSPC y la adquisición de las medidas durante la conexión de las distintas cargas, se ha realizado la calibración de los bloques de medida de corriente y tensión, los cuales forman parte del prototipo de SSPC.

Todas las medidas han sido realizadas con un osciloscopio, para evitar errores en la adquisición de los datos. En función de las medidas obtenidas durante la calibración de los distintos bloques, se han programado las diferentes señales de control del microcontrolador. Estas señales permiten realizar el control activo de acuerdo con las distintas estrategias presentadas en el capítulo 4.

#### 6.3.1 Resultados experimentales del control pasivo

Para validar la estrategia del control pasivo se va a conectar y desconectar una carga capacitiva a un bus de tensión constante. El SSPC, en este caso, no utiliza elementos activos que modifiquen el nivel de tensión en la puerta del semiconductor, ni elementos

que puedan modificar los pulsos de disparos que le llegan al driver que controla el semiconductor. De este modo, la tensión en  $C_g$ , únicamente, se regulada con el driver en combinación con redes formadas por condensadores y resistencias, ver Figura 6.13.



**Figura 6.13: Circuito de control pasivo propuesto**

Así pues, mediante el procedimiento del control pasivo el microcontrolador únicamente comanda una señal discreta de encendido - apagado; y no se utiliza ningún tipo de circuito de realimentación en el control, respecto de la corriente por el semiconductor. El control pasivo está basado en las especificaciones definidas en la Tabla 6.1.

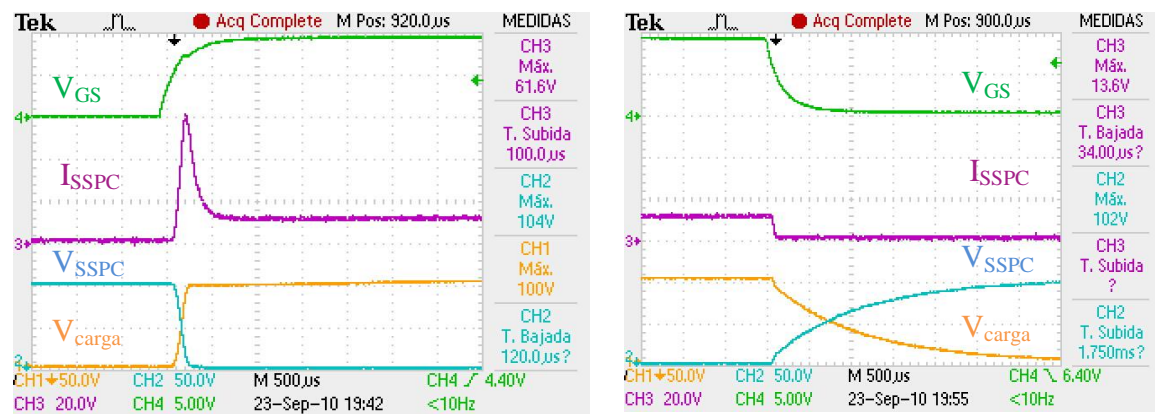
Parámetro conexión pasivo	Valores
Tensión de Bus	100 V
Corriente Nominal	10 A
Corriente Máxima Aproximada	62 A
Resistencia de la carga	10 $\Omega$
Condensadores de la carga	100 $\mu$ F

**Tabla 6.1: Especificación de conexión del control pasivo**

Para la selección de la carga capacitiva se ha tenido en cuenta las limitaciones del control pasivo en los diferentes rangos, de forma que se han seleccionado una carga capacitiva, la cual no exceda la corriente máxima de conexión de 60 A, durante los diferentes transitorios de conexión y en función de los parámetros de configuración.

En las siguientes figuras se recogen las formas de onda durante la conexión y desconexión de diferentes cargas de carácter capacitivo, mediante un control pasivo de la corriente por el SSPC.

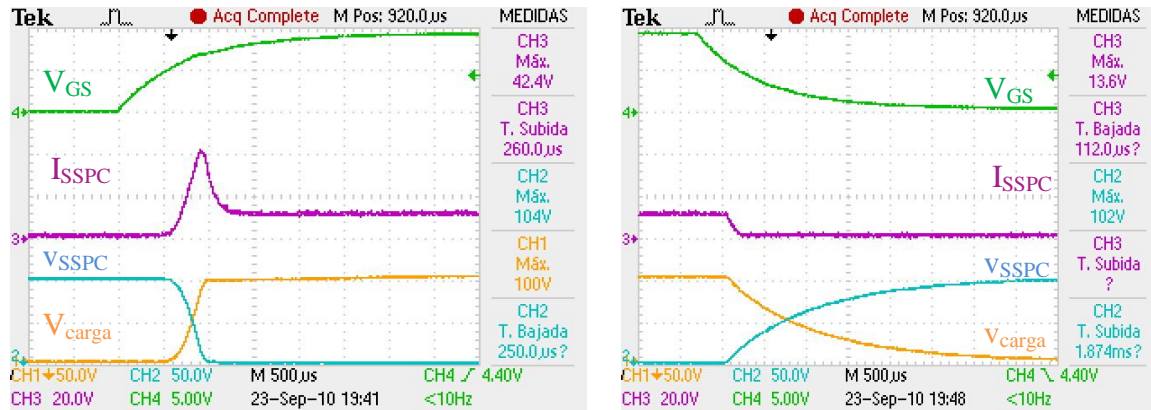
A partir de las constantes de tiempo de conexión y desconexión de 1 milisegundo, fijada por la  $R_{gON}$ ,  $R_{gOFF}$  y  $C_g$  se obtienen los resultados mostrados en la Figura 6.14. Es importante señalar que la corriente máxima que circula por el SSPC alcanza un valor de 61 A. Como se puede apreciar la tensión de control  $V_{GS}$ , evoluciona de forma exponencial, debido a la resistencia  $R_{gON}$  y  $C_g$ . Por otro lado, durante el transitorio de desconexión del SSPC la tensión  $V_{GS}$  está condicionada por la constante de tiempo impuesta por  $R_{gOFF}$  y  $C_g$ .



**Figura 6.14: Control Pasivo con  $R_{gON}=1\text{ k}\Omega$ ,  $R_{gOFF}=1\text{ k}\Omega$  y  $C_g=220\text{ nF}$  ( $\tau_{GS}=0,220\text{ ms}$ ) durante el intervalo de conexión y desconexión de la carga. Canal 1: Tensión en la carga ( $V_{carga}$ ). Canal 2: Tensión en el SSPC ( $V_{SSPC}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{GS}$ ). Tensión de bus 100 V**

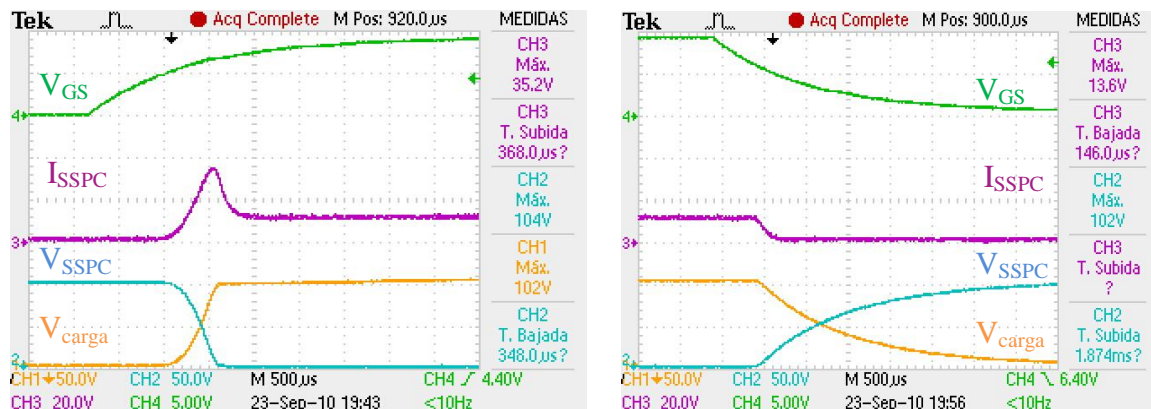
Si se incrementa el valor del condensador de puerta hasta 680 nF, el cual retrasa la carga del condensador  $C_g$ , y por lo tanto el valor de la tensión  $V_{GS}$ , manteniendo la resistencia

constante, se comprueba que aumenta el tiempo de conexión y se reduce la corriente máxima alcanzada en el SSPC a 42 A, Figura 6.15.



**Figura 6.15: Control Pasivo con  $R_{gON}=1\text{ k}\Omega$ ,  $R_{gOFF}=1\text{ k}\Omega$  y  $C_g=680\text{ nF}$  ( $\tau_{GS}=0,680\text{ ms}$ ) y durante el intervalo de la conexión y la desconexión de la carga. Canal 1: Tensión en la carga ( $V_{carga}$ ). Canal 2: Tensión en el SSPC ( $V_{SSPC}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{GS}$ ). Tensión de bus 100 V**

Para un valor del condensador de puerta de  $1\text{ }\mu\text{F}$ , manteniendo la resistencia constante, se comprueba como aumentan los tiempos de los transitorios de conexión y desconexión de la carga. Además, se reduce la corriente máxima en la carga hasta un nivel de 35 A, ver Figura 6.16.



**Figura 6.16: Control Pasivo con  $R_{gON}=1\text{ k}\Omega$  y  $R_{gOFF}=1\text{ k}\Omega$ ,  $C_g=1\text{ }\mu\text{F}$  ( $\tau_{GS}=1\text{ ms}$ ) durante el intervalo de la conexión y la desconexión de la carga. Canal 1: Tensión en la carga ( $V_{carga}$ ). Canal 2: Tensión en el SSPC ( $V_{SSPC}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{GS}$ ). Tensión de bus 100 V**

De los resultados obtenidos se puede comprobar experimentalmente el planteamiento realizado en el capítulo 4, en el que la evolución de la corriente se representó por una recta, de acuerdo con las aproximaciones realizadas.

Con los datos medidos de corriente nominal, corriente máxima, tensión de bus, resistencia y capacidad de carga, y mediante las hojas de cálculo del Anexo A, se obtienen los datos del tiempo de subida de conexión de acuerdo a los cálculos teóricos. La capacidad real ha sido medida con el analizador de impedancias [HP4194A]. Con estos dos valores, se evalúa el error cometido, mediante la comparación del valor teórico y experimental del tiempo de subida, con la expresión (4.84), ver Tabla 6.2.

Experimental						Teórico	
$V_{BUS}$ [V]	$I_{MAX}$ [A]	$I_{NOM}$ [A]	$C_{Medido}$ [ $\mu F$ ]	$R$ [ $\Omega$ ]	$t_s$ [ms]	$t_s$ [ms]	Error [%]
100	42,4	10	98,2	10	0,57	0,5496	3,57%
100	35,2	10	98,2	10	0,65	0,6883	5,57%

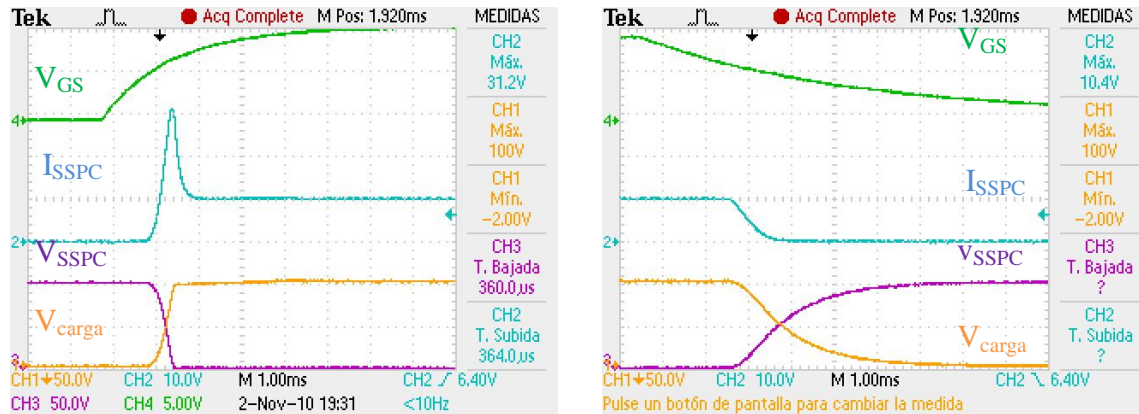
**Tabla 6.2: Medidas experimentales vs cálculos teóricos del control pasivo**

Como se puede apreciar en las gráficas, los tiempos de conexión de la carga aumentan con el incremento de la  $\tau_{GS}$ . Por otro lado, a medida que la constante de tiempo aumenta se disminuye la pendiente de conexión y la corriente máxima alcanzada en la carga. Este tiempo de conexión y desconexión está condicionado por el condensador situado entre la puerta y el surtidor, así como por la resistencia entre el condensador y el driver. De este modo, manteniendo un valor fijo de la  $C_g$ , y utilizando valores diferentes de  $R_{gON}$  y  $R_{gOFF}$  se pueden lograr tiempos de conexión y desconexión diferentes según las necesidades. Por lo tanto, con el prototipo diseñado es posible obtener diferentes constantes de tiempo, para los transitorios de conexión y desconexión, ver Figura 6.17.

Teniendo en cuenta las medidas experimentales se puede concluir que el método pasivo es bastante limitado desde el punto de vista de los tiempos de conexión. Esto limita la



conexión de condensadores muy grandes, ya que imponen altas corrientes durante la conexión, o elevados tiempos de conexión. Además, la posibilidad de reconfiguración de los parámetros de conexión, como son el tiempo de subida y la corriente máxima, es compleja y requiere de modificaciones hardware del prototipo.



**Figura 6.17: Control Pasivo con  $R_{gON}=2,2\text{ k}\Omega$ ,  $R_{gOFF}=6,8\text{ k}\Omega$  y  $C_g=680\text{ nF}$  durante la conexión ( $\tau_{GS\_ON}=1,5\text{ ms}$ ) y la desconexión ( $\tau_{GS\_OFF}=4,6\text{ ms}$ ). Canal 1: Tensión en la carga ( $V_{carga}$ ). Canal 2: Corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ). Canal 3: Tensión en el SSPC ( $V_{SSPC}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{GS}$ ). Tensión de bus 100 V**

Finalmente, una vez analizados los resultados obtenidos durante la conexión con control pasivo se ajustan los valores óptimos de  $C_g$ ,  $R_{gON}$  y  $R_{gOFF}$ , ver Tabla 6.3, de manera que se fijan estos parámetros para todos los casos de control activo.

Parámetro	Valor
$R_{gON}$	2200 $\Omega$
$R_{gOFF}$	6800 $\Omega$
$C_g$	680 nF

**Tabla 6.3: Parámetros internos de configuración del SSPC, de la carga y la descarga de  $C_g$  con control activo**

Teniendo en cuenta que el valor de la red RC en el apagado no se ve afectada ni cambia durante todos los procedimientos de control activo propuestos, los resultados



experimentales de los diferentes procedimientos de control activo se van a centrar en la conexión de la carga, y por ello sólo se mostrará el transitorio de conexión y no el transitorio de la desconexión.

### 6.3.2 Resultados experimentales del control activo con derivada constante de la corriente

La validación experimental del control activo con derivada constante de la corriente se va a implementar con las dos estrategias propuestas, ver apartados 6.2.2.2 y 6.2.2.1. En primer lugar se va a regular la carga y descarga de  $C_g$  de forma lineal mediante el microcontrolador y el DAC incluido en la tarjeta de desarrollo comercial. En segundo lugar se ensayará la regulación conmutada con el circuito que regula los pulsos de disparo a partir de una señal de referencia generada por el microcontrolador.

De este modo, se pretende contrastar y valorar las prestaciones de cada caso, para seleccionar la mejor estrategia de control de la carga y descarga del condensador  $C_g$ . Durante los procedimientos de conexión se han utilizado las tensiones de bus, corriente nominal, los valores de resistencias y capacidades incluidos en la Tabla 6.4.

Parámetro	Teórica
Tensión de Bus	50 V y 100 V
Corriente Nominal	$I_N = 10 \text{ A}$
Corrientes Máximas	$I_{MAX} < 60 \text{ A}$
Resistencia de carga	5 $\Omega$ y 10 $\Omega$
Condensadores de carga	100 $\mu\text{F}$ , 220 $\mu\text{F}$ , 470 $\mu\text{F}$ , 3600 $\mu\text{F}$ , 5400 $\mu\text{F}$

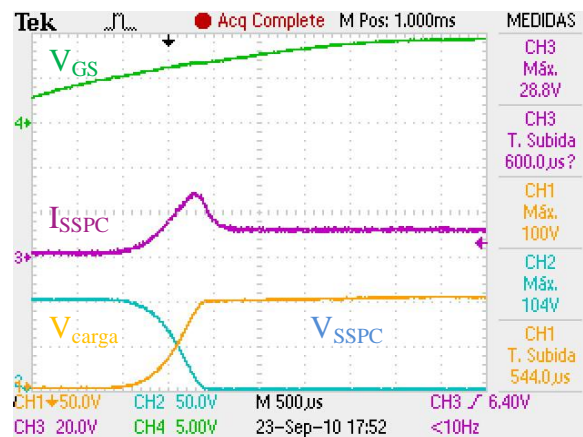
**Tabla 6.4: Especificación de conexión del SSPC con control activo con derivada constante de la corriente**

En los siguientes apartados se presentan los resultados experimentales de los dos circuitos propuestos, que permiten el control activo de la corriente por el SSPC con derivada constante de la corriente.

### 6.3.2.1 Mediante la regulación lineal de la tensión en el condensador $C_g$

El primer circuito que se ha utilizado para realizar el control activo con derivada constante de la corriente, regula la carga del condensador mediante una fuente de corriente diseñada a partir de un transistor bipolar, ver Figura 6.6. Para validar el circuito de control se ha aplicado, al circuito que controla la descarga del condensador  $C_g$ , un nivel de corriente proporcional con la  $I_{SSPC}$  medida. Esta señal la genera el microcontrolador con el convertidor digital analógico interno. En las siguientes figuras se recogen la conexión de cada una de las cargas altamente capacitivas.

En la Figura 6.18 se muestra el transitorio de conexión de una carga capacitiva con un condensador de  $100\ \mu\text{F}$ . Como se puede apreciar la evolución de la corriente cuando se controla la tensión de  $C_g$  con el microcontrolador no es del todo lineal y se aproxima al comportamiento de un control pasivo.

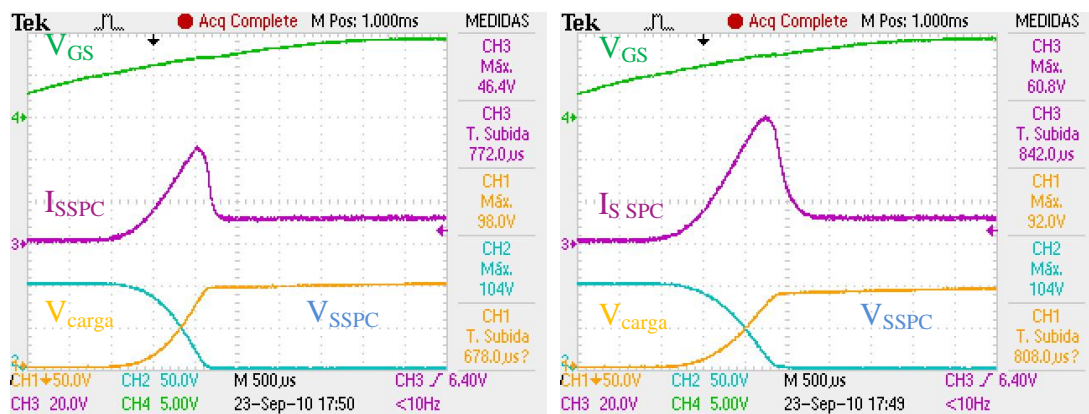


**Figura 6.18: Control activo con derivada de corriente con una carga de  $10\ \Omega$  y  $100\ \mu\text{F}$ . Canal 1: Tensión en la carga ( $V_{\text{carga}}$ ). Canal 2: Tensión en el SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{\text{GS}}$ ). Tensión de bus  $100\ \text{V}$**

Si se compara con el transitorio de conexión con control pasivo con las mismas condiciones, ver Figura 6.17, se puede observar que se reducen los niveles de corriente

máxima de forma notable (28,8 A frente a 31,2 A). Así pues, con este control activo es posible variar la pendiente de la corriente por el SSPC y con ello los tiempos de conexión, en comparación con el control pasivo.

Si se compara el transitorio durante la conexión de dos cargas capacitivas distintas, Figura 6.19, se aprecia que es posible la conexión de cargas capacitivas incrementando el nivel máximo de corriente por el SSPC, y los tiempos de conexión del transitorio.



**Figura 6.19: Control activo con derivada de corriente con una carga de 10  $\Omega$  y 220  $\mu$ F (izquierda) y de 10  $\Omega$  y 470  $\mu$ F (derecha). Canal 1: Tensión en la carga ( $V_{carga}$ ). Canal 2: Tensión en el SSPC ( $V_{SSPC}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{GS}$ ). Tensión de bus 100 V**

Aunque los resultados obtenidos con esta estrategia de regulación no son totalmente lineales, se han comprobado con la ecuación (4.83) presentada en el capítulo 4, para los valores experimentales obtenidos con la regulación lineal de la tensión de  $C_g$ .

Con los datos medidos de corriente nominal, corriente máxima, tensión de bus, resistencia y capacidad de carga, y mediante las hojas de cálculo del Anexo A, se obtienen los datos del tiempo de subida de conexión de acuerdo a los cálculos teóricos. La capacidad real ha sido medida con el analizador de impedancias [HP4194A]. El error cometido se evalúa mediante la comparación del valor teórico y experimental del tiempo de subida con la expresión (4.84), ver Tabla 6.5.

Debido a la forma de onda de la corriente, el error cometido es elevado, llegando a superar el 10% en algunos casos, ver Tabla 6.5. Esto es debido a que la aproximación realizada en

el capítulo 4, no es totalmente aplicable en este caso ya que el control activo no presenta unos resultados lineales.

Experimental						Teórico	
$V_{BUS}$ [V]	$I_{MAX}$ [A]	$I_{NOM}$ [A]	$C_{Medido}$ [ $\mu F$ ]	$R$ [ $\Omega$ ]	$t_s$ [ms]	$t_s$ [ms]	Error [%]
100	28,8	10	98	10	0,83	0,8855	6,69%
100	46,4	10	216	10	1,2	1,0872	9,40%
100	60,8	10	437	10	1,35	1,6145	11,35%

**Tabla 6.5: Medidas experimentales del control activo con derivada constante de la corriente (regulación lineal) vs resultados teóricos**

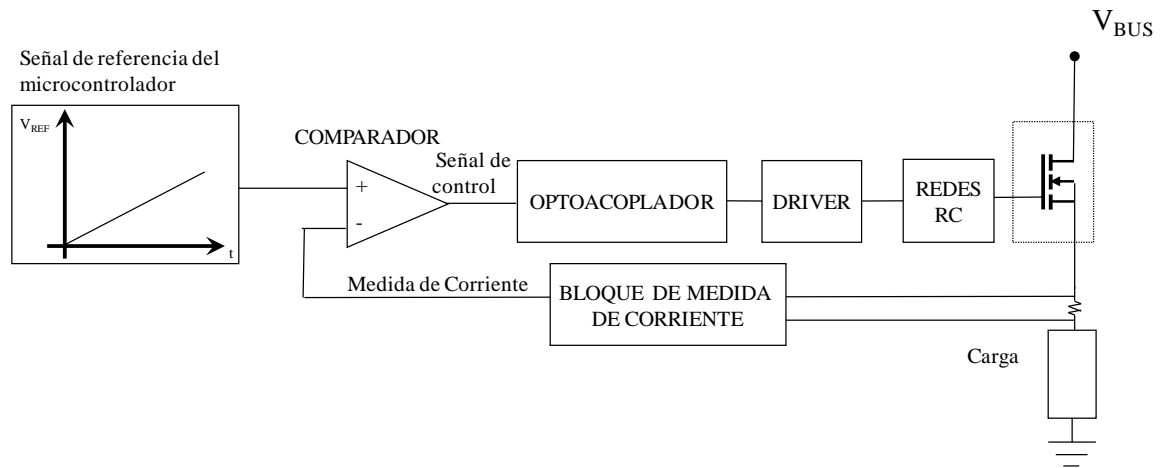
A partir de los resultados obtenidos mediante la regulación lineal se puede concluir que el control está muy influenciado por los tiempos de procesado del microcontrolador, sumado al tiempo requerido por el bloque de conversión digital analógico (DAC) y el analógico digital (ADC). Así pues, este procedimiento requiere de una frecuencia de reloj del microcontrolador elevada, y además, es muy dependiente de los tiempos de procesado de los ADC y DAC, internos del microcontrolador, y de los parámetros del transistor bipolar. Por lo tanto, es necesario comprobar el procedimiento propuesto basado en la regulación conmutada de la tensión en  $C_g$ , para realizar el control activo por derivada de corriente constante.

#### 6.3.2.2 Mediante la regulación conmutada de la tensión del condensador $C_g$

El segundo circuito propuesto compara el nivel de corriente que circula por el SSPC, obtenido a partir del bloque de medida optoacoplado, con una rampa creciente generada por el microcontrolador, ver Figura 6.20.

De este modo, se obtienen los pulsos de disparo de entrada al driver, que permiten una regulación de la tensión en la puerta del MOSFET, con la cual se logra una evolución de

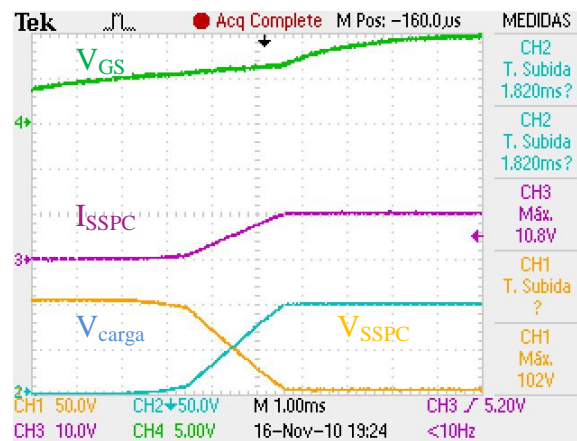
la corriente del SSPC con derivada constante de la corriente, de acuerdo con la rampa introducida por el microcontrolador.



**Figura 6.20: Detalle del circuito de control mediante control activo con derivada constante de la corriente, regulación conmutada**

Durante la realización de los ensayos, se ha probado el control activo con derivada constante de la corriente con dos niveles de tensión de bus, con el objetivo de validar que el procedimiento es adecuado en ambos casos.

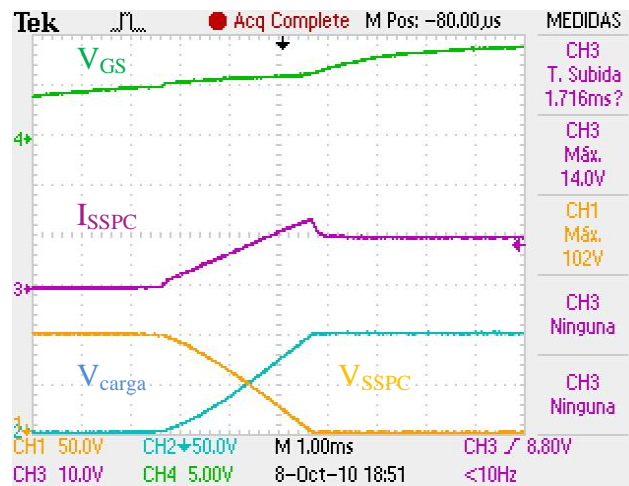
La primera prueba de conexión se realiza con una carga puramente resistiva de  $5\ \Omega$ . Como se puede observar la corriente evoluciona de forma lineal, ver Figura 6.21.



**Figura 6.21: Control activo con derivada constante de la corriente con una carga resistiva pura de  $5\ \Omega$ . Canal 1: Tensión en el SSPC ( $V_{SSPC}$ ). Canal 2: Tensión en la carga ( $V_{carga}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{GS}$ ). Tensión de bus 100 V**

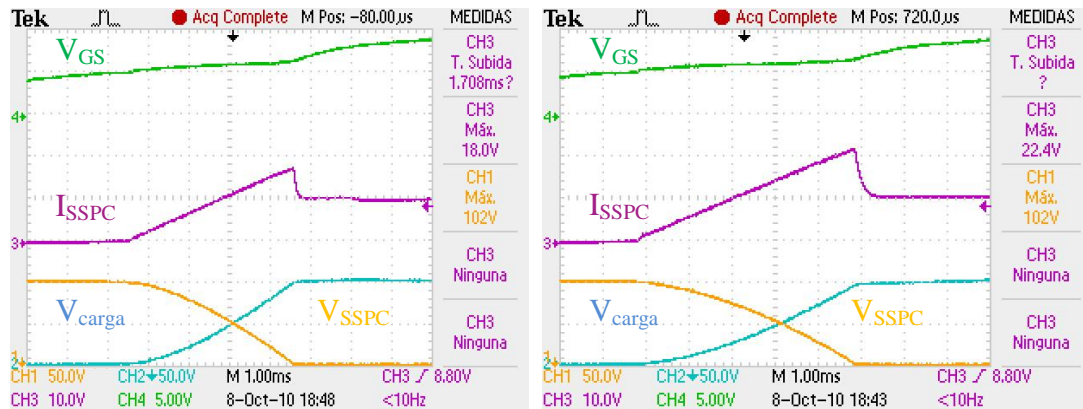
El motivo de que la corriente durante el transitorio de conexión evolucione como una rampa, es debido a la rampa de control introducida por el microcontrolador durante el transitorio de conexión.

En la Figura 6.22 se muestra la conexión de una carga con carácter capacitivo,  $10\ \Omega$  y  $100\ \mu\text{F}$ , con derivada constante de la corriente. Como se puede apreciar, la evolución de las formas de onda de la corriente por el SSPC es totalmente lineal. Así pues, la corriente evoluciona desde cero hasta un valor máximo de 14 amperios y una vez que se carga el condensador, la corriente por el SSPC alcanza su valor nominal en un tiempo de conexión de aproximadamente 3 milisegundos.



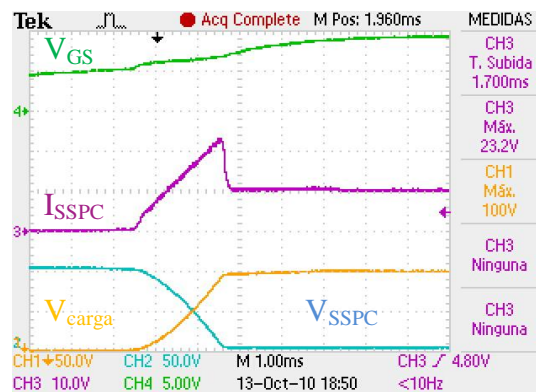
**Figura 6.22: Control activo con derivada constante de la corriente con una carga de  $10\ \Omega$  y  $100\ \mu\text{F}$ . Canal 1: Tensión en el SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). Canal 2: Tensión en la carga ( $V_{\text{carga}}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{\text{GS}}$ ). Tensión de bus 100 V**

En la Figura 6.23 se compara la conexión de dos cargas capacitivas distintas. Se puede apreciar que es posible la conexión manteniendo la corriente por el SSPC con la misma pendiente en ambos casos, con un aumento en la duración del transitorio de conexión, y diferentes niveles de corriente en cada uno de los casos, ver Figura 6.23.



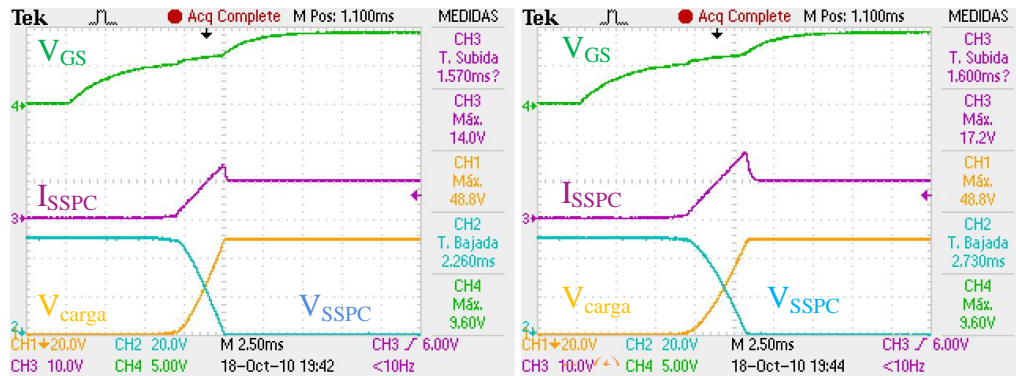
**Figura 6.23:** Control activo con derivada constante de la corriente con una carga de  $10\ \Omega$  y  $220\ \mu\text{F}$  (izquierda) y  $10\ \Omega$  y  $470\ \mu\text{F}$  (derecha). Canal 1: Tensión en el SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). Canal 2: Tensión en la carga ( $V_{\text{carga}}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{\text{GS}}$ ). Tensión de bus 100 V

También, es posible variar la pendiente de la corriente durante el transitorio de conexión, lo cual permite reducir los tiempos de conexión de la carga. De este modo para una carga con un condensador de  $220\ \mu\text{F}$ , Figura 6.24, se ha reducido el tiempo de conexión (en 2 milisegundos) en comparación con la rampa de la Figura 6.23. Sin embargo, la reducción de los tiempos impone un incremento del pico de corriente máxima en el SSPC (23,2 A), ver Figura 6.24.



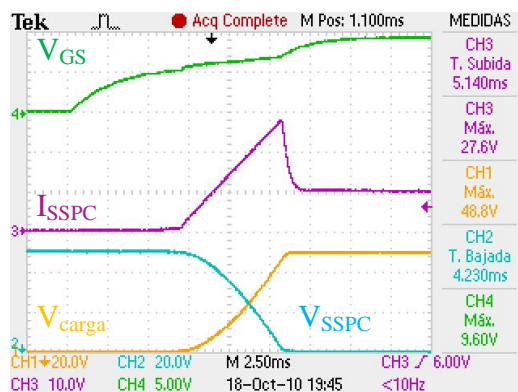
**Figura 6.24:** Control activo con derivada constante de la corriente con una carga de  $10\ \Omega$  y  $220\ \mu\text{F}$ . Canal 1: Tensión en la carga ( $V_{\text{carga}}$ ). Canal 2: Tensión en el SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{\text{GS}}$ ). Tensión de bus 100 V

Con este procedimiento de control es posible conectar cargas a un bus de diferentes tensiones sin ningún tipo de limitación. En la Figura 6.25 se muestra la conexión para una carga capacitiva de 220  $\mu\text{F}$  a un bus de 50 V (izquierda) y una carga capacitiva de 470  $\mu\text{F}$  al mismo bus de tensión (derecha). En ambos casos la corriente se mantiene por debajo de 17,2 A.



**Figura 6.25: Control activo con derivada constante de la corriente con una carga de 5  $\Omega$  y 220  $\mu\text{F}$  (izquierda) y 5  $\Omega$  y 470  $\mu\text{F}$  (derecha). Canal 1: Tensión en la carga ( $V_{carga}$ ). Canal 2: Tensión en el SSPC ( $V_{SSPC}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{GS}$ ). Tensión de bus 50 V**

Para un condensador de un valor de 1800  $\mu\text{F}$  se comprueba que se realiza la conexión de la carga con una corriente de pico de 27,6 A y un tiempo de conexión inferior a 7 milisegundos, ver Figura 6.26.



**Figura 6.26: Control activo con derivada constante de la corriente con una carga de 5  $\Omega$  y 1800  $\mu\text{F}$ . Canal 1: Tensión en la carga ( $V_{carga}$ ). Canal 2: Tensión en el SSPC ( $V_{SSPC}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{GS}$ ). Tensión de bus 50 V**



Para validar las ecuaciones con una mayor precisión se han seleccionado las medidas con un bus de tensión de 50 V principalmente, ya que para este caso la tensión de bus permanece constante y no aparecen caídas de tensión para altos niveles de corriente, como consecuencia de la activación de la protección por sobrecarga.

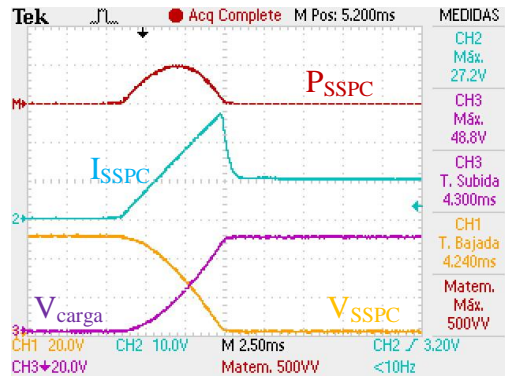
Con los datos medidos de corriente nominal, corriente máxima, tensión de bus, resistencia y capacidad de carga, y mediante las hojas de cálculo del Anexo A, se obtienen los datos del tiempo de subida que se conecta de acuerdo a los cálculos teóricos. La capacidad real ha sido medida con el analizador de impedancias [HP4194A]. El error cometido se evalúa mediante la comparación del valor teórico y experimental del tiempo de subida con la expresión (4.84), ver Tabla 6.4.

De los resultados obtenidos se puede apreciar como el error cometido, en los tiempos de conexión, está siempre por debajo del 6%. Así pues, se pueden verificar la expresión que permite calcular el condensador máximo, que se puede conectar mediante control activo con derivada constante de la corriente.

Experimental						Teórico	
$V_{BUS}$ [V]	$I_{MAX}$ [A]	$I_{NOM}$ [A]	$C_{Medido}$ [ $\mu F$ ]	$R$ [ $\Omega$ ]	$t_s$ [ms]	$t_s$ [ms]	Error [%]
100	14	10	98	10	2,8	2,67272	4,55%
100	18	10	216	10	4	3,81176	4,71%
100	22,4	10	437	10	5,3	5,55508	4,81%
100	23,2	10	216	10	2,5	2,61290	4,52%
50	14	10	226	5	3	3,09095	3,03%
50	17,2	10	416	5	4,1	3,95819	3,46%
50	27,6	10	1502	5	6,8	7,17515	5,52%

**Tabla 6.6: Medidas experimentales vs resultados teóricos del control activo con derivada constante de la corriente (regulación conmutada)**

Por otro lado, de acuerdo con el análisis del capítulo 4, este procedimiento permite limitar los niveles de potencia máxima disipada en el semiconductor, ver Figura 6.27.



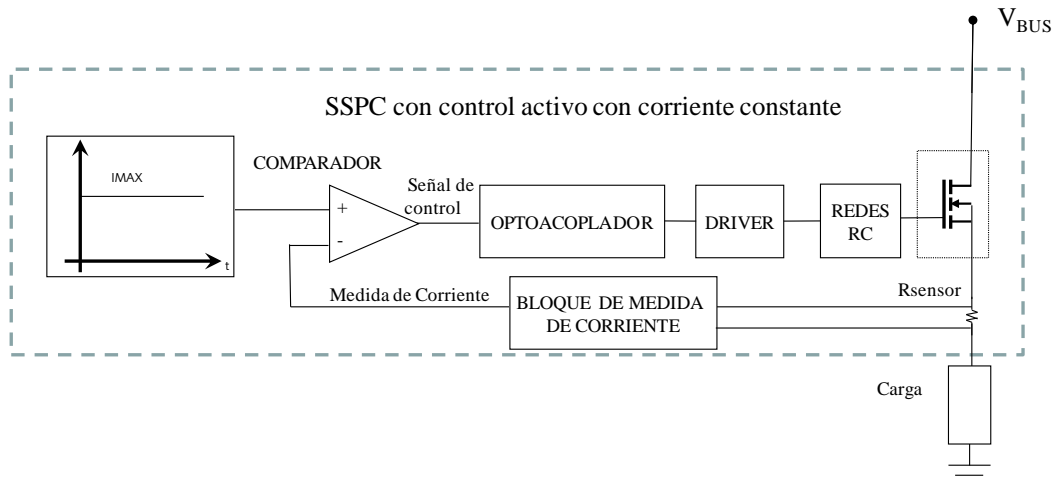
**Figura 6.27: Control activo con derivada constante de la corriente con carga de  $5\ \Omega$  y  $1800\ \mu\text{F}$ . Canal 1: Tensión en el SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). Canal 2: Corriente por el SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). Canal 3: Tensión en la carga ( $V_{\text{carga}}$ ). Canal M: Potencia disipada por el SSPC. Tensión de bus 50 V**

Se puede concluir que mediante el control activo con derivada constante de la corriente, es posible conectar cargas altamente capacitivas limitando la evolución de la corriente y el valor máximo de la misma, manteniendo constante la derivada de la corriente.

### 6.3.3 Resultados experimentales del control activo con corriente constante

La validación experimental del control activo con corriente constante se va a realizar con el circuito de control activo mediante regulación conmutada propuesto para el control de la tensión del condensador  $C_g$ . Así pues, para implementar el control activo se compara el nivel de corriente por el SSPC, con un nivel constante fijado por el microcontrolador, mediante el circuito comparador externo al microcontrolador, ver Figura 6.28.

Durante la conexión de la carga altamente capacitiva, cuando la corriente alcanza el nivel de corriente máximo programado, el lazo de realimentación se encarga de mantener el nivel de la tensión en  $C_g$  constante hasta que se produce la carga del condensador, de forma que la corriente por el SSPC se mantiene también constante, realizando una carga controlada del condensador y evitando niveles no deseados de corriente que pueden dañar el semiconductor.



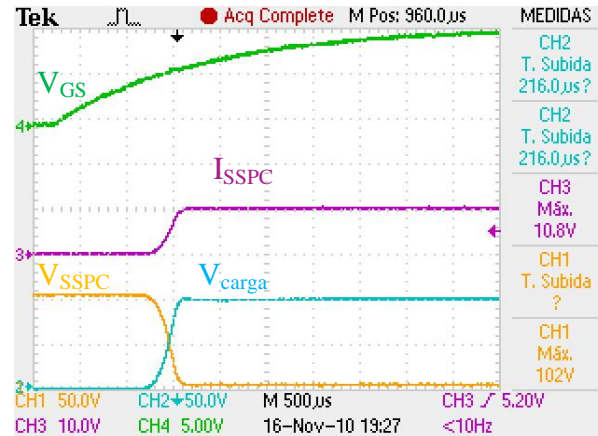
**Figura 6.28: Detalle del circuito de control mediante control activo con corriente constante**

Los parámetros de conexión durante la validación experimental del control activo con corriente constante se han incluido en la Tabla 6.7.

Parámetro	Teórica
Tensión de Bus	50 V y 100 V
Corriente Nominal	$I_N = 10 \text{ A}$
Corriente Máxima	$I_{MAX} = 25 \text{ A}$
Resistencia de carga	5 $\Omega$ y 10 $\Omega$
Condensadores de carga	220 $\mu\text{F}$ , 470 $\mu\text{F}$ , 1800 $\mu\text{F}$ , 3600 $\mu\text{F}$ , 5400 $\mu\text{F}$

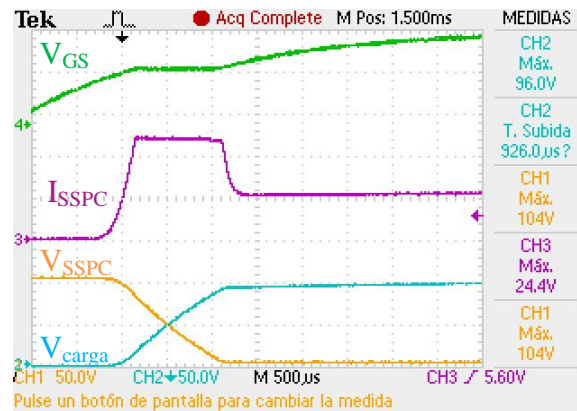
**Tabla 6.7: Especificaciones de conexión del SSPC con control activo con corriente constante**

Inicialmente se muestra la conexión de una carga resistiva mediante el SSPC con control activo por corriente constante, ver Figura 6.29. Se comprueba que el SSPC alcanza la corriente nominal de 10 A con unos tiempos por debajo de 500 microsegundos, inferiores a los tiempos de conexión obtenidos mediante el control activo con derivada constante de la corriente, ver Figura 6.21.



**Figura 6.29:** Control activo con corriente constante con una carga resistiva de 5  $\Omega$  y con corriente constante de 25 A. Canal 1: Tensión en el SSPC ( $V_{SSPC}$ ). Canal 2: Tensión en la carga ( $V_{carga}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{GS}$ ). Tensión de bus 100 V

En la Figura 6.30 se muestra el transitorio de conexión de una carga con carácter capacitivo, que incluye un condensador de 220  $\mu$ F a un bus de 100 V.



**Figura 6.30:** Control activo con corriente constante con una carga de 10  $\Omega$  y 220  $\mu$ F y con corriente constante de 24 A. Canal 1: Tensión en el SSPC ( $V_{SSPC}$ ). Canal 2: Tensión en la carga ( $V_{carga}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{GS}$ ). Tensión de bus 100 V

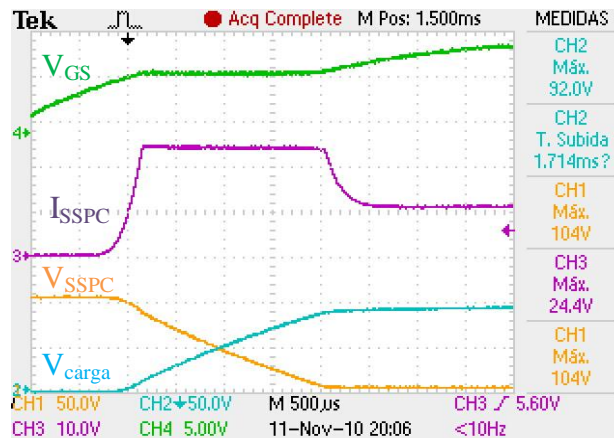
Como se puede apreciar en Figura 6.30, el transitorio de conexión se realiza con una corriente constante limitada por un valor impuesto por el microcontrolador. De este modo la corriente evoluciona instantáneamente hasta este valor, y una vez que se alcanza el valor de la corriente de conexión la  $V_{GS}$  se mantiene constante hasta que se produce la

carga del condensador, momento en el que la corriente por el SSPC alcanza su valor nominal y el MOSFET entra en zona óhmica.

Por otro lado, las tensiones en la carga y en el SSPC evolucionan de forma prácticamente lineal hasta alcanzar su valor final, durante el transitorio de conexión. Si se compara con el procedimiento pasivo, ver Figura 6.17, se puede apreciar que mediante este control activo se pueden conectar en un milisegundo condensadores de aproximadamente el doble del valor de capacidad, ver Figura 6.30, con una corriente totalmente controlada.

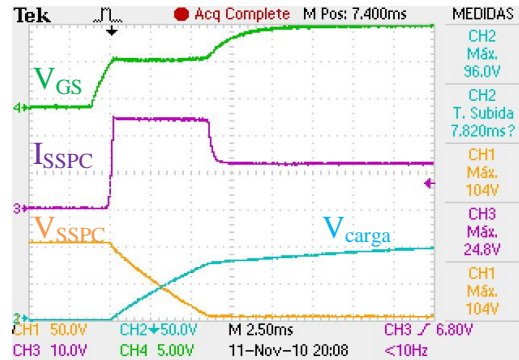
Por otro lado, se puede apreciar como la evolución de la tensión de control del MOSFET,  $V_{GS}$ , se mantiene constante.

Durante la conexión de una carga capacitiva con un condensador de  $470\ \mu\text{F}$ , se comprueba cómo aumenta el tiempo de conexión hasta 2 milisegundos para el mismo nivel de corriente constante de  $24,4\ \text{A}$ , ver Figura 6.31.



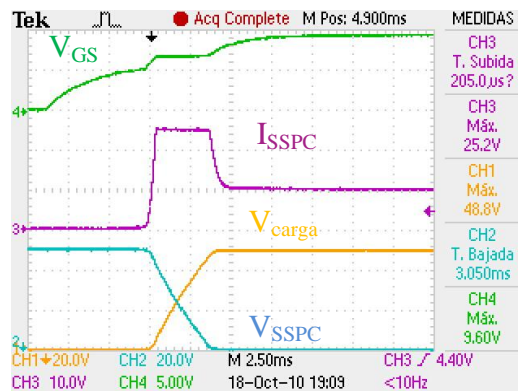
**Figura 6.31: Control activo con corriente constante con una carga de  $10\ \Omega$  y  $470\ \mu\text{F}$  y con corriente constante de  $24,4\ \text{A}$ . Canal 1: Tensión en el SSPC ( $V_{SSPC}$ ). Canal 2: Tensión en la carga ( $V_{carga}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor  $V_{GS}$ . Tensión de bus  $100\ \text{V}$**

En la Figura 6.32 se muestra el aumento del tiempo de conexión requerido para la conexión de una carga con una capacidad de  $2270\ \mu\text{F}$  y para un nivel de corriente limitado de  $25\ \text{A}$ .



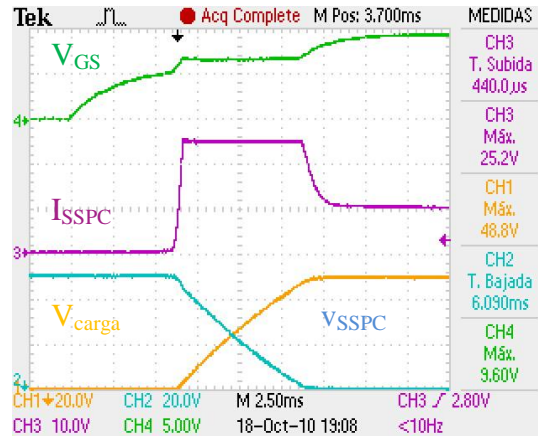
**Figura 6.32: Control activo con corriente constante con una carga de  $10\ \Omega$  y  $2270\ \mu\text{F}$  y con corriente constante de  $25\ \text{A}$ . Canal 1: Tensión en el SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). Canal 2: Tensión en la carga ( $V_{\text{carga}}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor  $V_{\text{GS}}$ . Tensión de bus  $100\ \text{V}$**

Para validar las ecuaciones con diferentes tensiones de bus se han tomado medidas con un bus de tensión de  $50\ \text{V}$ . Para este caso, además la tensión de bus permanece constante y se pueden aumentar las capacidades sin que actúe la limitación de potencia de la fuente de alimentación. En la Figura 6.33 se muestra la conexión de una carga con una capacidad de  $1800\ \mu\text{F}$ .



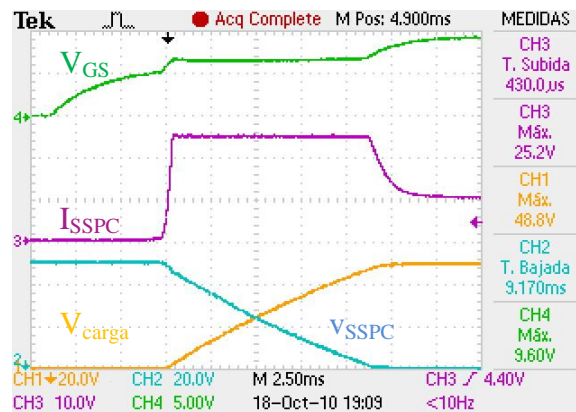
**Figura 6.33: Control activo con corriente constante con una carga de  $5\ \Omega$  y  $1800\ \mu\text{F}$  y con corriente constante de  $25\ \text{A}$ . Canal 1: Tensión en la carga ( $V_{\text{carga}}$ ). Canal 2: Tensión en el SSPC  $V_{\text{SSPC}}$ . Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor  $V_{\text{GS}}$ . Tensión de bus  $50\ \text{V}$**

Cuando se aumenta el valor del condensador de carga hasta  $3600\ \mu\text{F}$ , se comprueba como aumenta el tiempo de conexión para el mismo nivel de corriente constante, Figura 6.34.



**Figura 6.34:** Control activo con corriente constante con una carga de  $5 \Omega$  y  $3600 \mu\text{F}$  y con corriente constante de 25 A. Canal 1: Tensión en la carga ( $V_{\text{carga}}$ ). Canal 2: Tensión en el SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). Canal 4: Tensión de ( $V_{\text{GS}}$ ). Tensión de bus 50 V

En la Figura 6.35 se muestra el aumento del tiempo de conexión para una capacidad de  $5400 \mu\text{F}$  con nivel de corriente constante de 25 A. En este caso, al igual que en el resto de casos se puede observar cómo se mantiene la tensión  $V_{\text{GS}}$  constante durante el transitorio de conexión.



**Figura 6.35:** Control activo con corriente constante con una carga de  $5 \Omega$  y  $5400 \mu\text{F}$  y con corriente constante de 25 A. Canal 1: Tensión en la carga ( $V_{\text{carga}}$ ). Canal 2: Tensión en el SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{\text{GS}}$ ). Tensión de bus 50 V

En la Tabla 6.8 se muestran la validación de las expresiones presentadas en el capítulo 4, con los resultados obtenidos mediante el control activo por corriente constante para los buses de 50 V y 100 V.

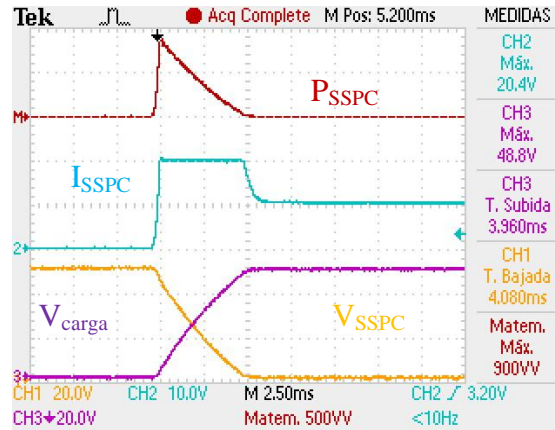
Experimental						Teórico	
$V_{BUS}$ [V]	$I_{MAX}$ [A]	$I_{NOM}$ [A]	$C_{Medido}$ [ $\mu F$ ]	$R$ [ $\Omega$ ]	$t_m$ [ms]	$t_m$ [ms]	Error [%]
100	24	10	216	10	1	1,024	2,41%
100	24,4	10	437	10	2,1	2,188	4,17%
100	25,2	10	1552	10	7,5	7,706	2,74%
50	25,2	10	1552	5	3,59	3,717	3,54%
50	25,2	10	3092	5	7,5	7,610	1,46%
50	25,2	10	4593	5	11	11,404	3,67%

**Tabla 6.8: Medidas experimentales vs resultados teóricos del control activo con corriente constante**

Con la Tabla 6.8 se valida la expresión (4.40). A partir de los datos medidos de corriente nominal, corriente máxima, tensión de bus, resistencia y capacidad de carga, y mediante las hojas de cálculo del Anexo A, se obtienen los datos del tiempo de mantenimiento en la conexión de acuerdo a los cálculos teóricos. La capacidad real ha sido medida con el analizador de impedancias [HP4194A]. Con estos dos valores, se evalúa el error cometido, mediante la comparación del valor teórico y experimental del tiempo de mantenimiento con la expresión (4.42), ver Tabla 6.8.

Además, de acuerdo con el análisis del capítulo 4, es importante señalar que este procedimiento incrementa los niveles potencia máxima disipada en el semiconductor durante los instantes iniciales, ver Figura 6.36, en comparación con el control activo con derivada constante de la corriente.





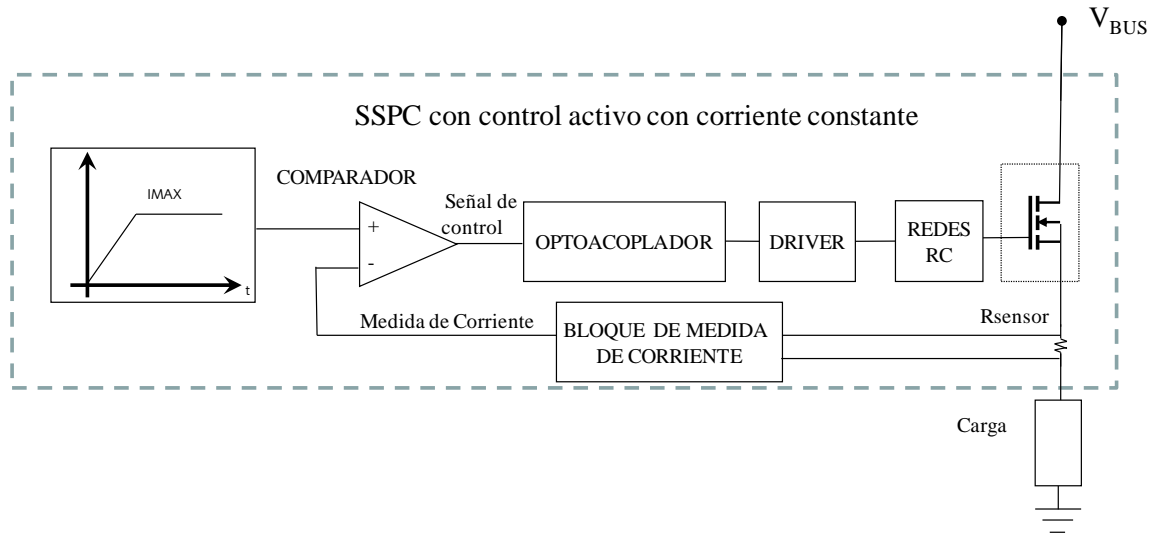
**Figura 6.36: Control activo con corriente constante con carga de  $5\ \Omega$  y  $1800\ \mu\text{F}$ . Canal 1: Tensión en el SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). Canal 2: Corriente por el SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). Canal 3: Tensión en la carga ( $V_{\text{carga}}$ ). Canal M: Potencia disipada por el SSPC. Tensión de bus 50 V**

De las medidas experimentales se puede concluir que el método activo mediante corriente constante es bastante mejor que el control pasivo, sin embargo, como se estudio en el capítulo 4, aumenta la necesidad de disipación de potencia del semiconductor durante los instantes iniciales del transitorio de conexión, lo cual limita la conexión de determinadas cargas.

Desde el punto de vista de los tiempos de conexión y la posibilidad de reconfiguración de los parámetros de conexión, el procedimiento es totalmente programable y permite variar los límites de corrientes máximas, y con ello los tiempos de conexión, sin necesidad de modificaciones hardware, así como adaptarlo a diferentes buses de tensión.

#### 6.3.4 Resultados experimentales del control activo generalizado

Una vez realizados los procedimientos de conexión de cargas con control activo por corriente constante y con derivada constante de la corriente por el SSPC, se puede realizar los ensayos con conexión generalizada. Este procedimiento de conexión consiste en una combinación del procedimiento activo con derivada constante de la corriente durante los instantes iniciales de la conexión y de corriente constante en los instantes finales del transitorio de conexión, ver Figura 6.37.



**Figura 6.37: Detalle del circuito de control mediante control activo generalizado**

Para la conexión de la carga resistiva las formas de onda durante el transitorio de conexión con control activo generalizado, evolucionan igual que el procedimiento con derivada constante de la corriente, ver Figura 6.21.

En la Tabla 6.9 se incluyen las especificaciones de conexión del control activo generalizado.

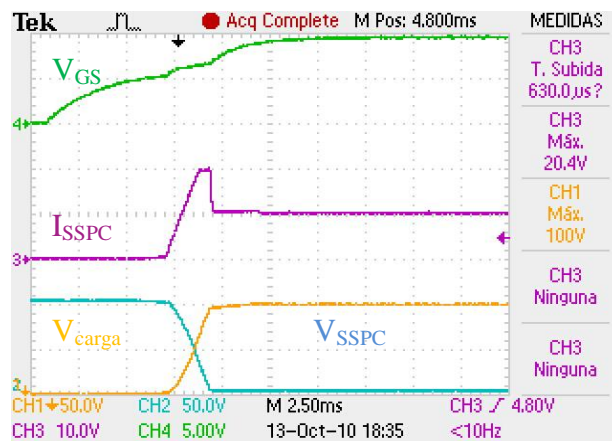
Parámetro	Teórica
Tensión de Bus	50 V y 100 V
Corriente Nominal	$I_N = 10 \text{ A}$
Corrientes Máximas	$I_{MAX} < 27 \text{ A}$
Resistencia de carga	5 $\Omega$ y 10 $\Omega$
Condensadores de carga	220 $\mu\text{F}$ , 1800 $\mu\text{F}$ , 2270 $\mu\text{F}$ , 3600 $\mu\text{F}$ , 5400 $\mu\text{F}$

**Tabla 6.9: Especificaciones de conexión del SSPC con control activo generalizado**

El primer resultado para una carga con carácter capacitivo corresponde a unos valores de 10  $\Omega$  y 220  $\mu\text{F}$ . Como se puede apreciar en la Figura 6.38 la corriente evoluciona en dos

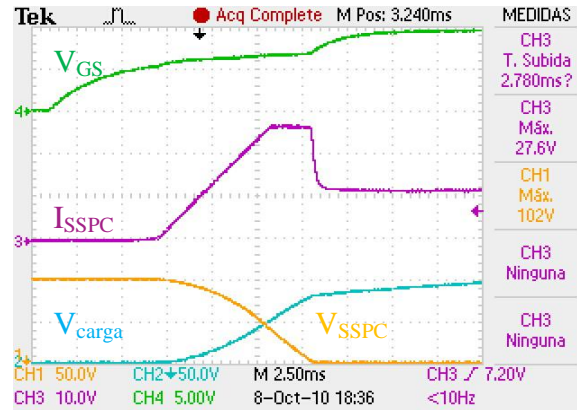
tramos bien identificados. Durante el primer tramo la corriente evoluciona con derivada constante de la corriente hasta alcanzar el valor máximo programado al finalizar el tiempo de subida. En este valor la corriente se mantiene constante, en el segundo tramo, hasta que se realiza la carga total del condensador, al finalizar el tiempo de mantenimiento. Una vez se produce la carga del condensador, la corriente alcanza el valor nominal dependiente del valor de la resistencia de carga.

Mediante el control activo generalizado es posible programar cualquier nivel máximo de corriente permitido, en este caso 20 A, así como los tiempos en los que la corriente alcanza este nivel máximo ó tiempo de subida, a partir de la señal de control del microcontrolador, ver Figura 6.38.



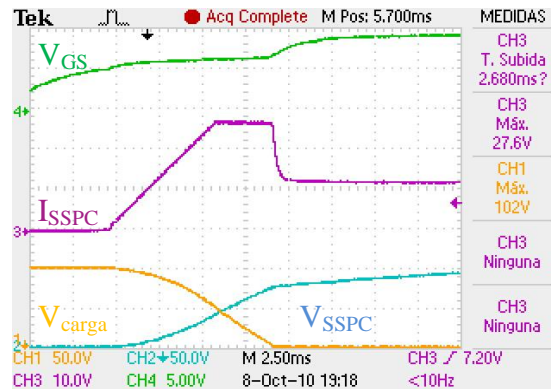
**Figura 6.38: Control activo generalizado con una carga de  $10\ \Omega$  y  $220\ \mu\text{F}$  y con corriente máxima 20 A. Canal 1: Tensión en el SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). Canal 2: Tensión en la carga ( $V_{\text{carga}}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{\text{GS}}$ ). Tensión de bus 100 V**

En la Figura 6.39 se muestra la conexión mediante el mismo procedimiento pero aumentando el nivel máximo de corriente máxima permitida hasta 27,6 A. Esto permite aumentar el valor de la capacidad de la carga reduciendo los tiempos de conexión.



**Figura 6.39:** Control activo generalizado con una carga de  $10\ \Omega$  y  $1800\ \mu\text{F}$  y con corriente máxima  $27,6\ \text{A}$ . Canal 1: Tensión en la carga ( $V_{\text{carga}}$ ). Canal 2: Tensión en el SSPC ( $V_{\text{SSPP}}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{\text{SSPP}}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{\text{GS}}$ ). Tensión de bus  $100\ \text{V}$

De este modo, para los niveles de corriente máxima de  $27,6\ \text{A}$  es posible conectar cargas con condensadores mayores aumentando el tiempo de conexión, ver Figura 6.40, manteniendo el semiconductor dentro de la zona de operación segura.

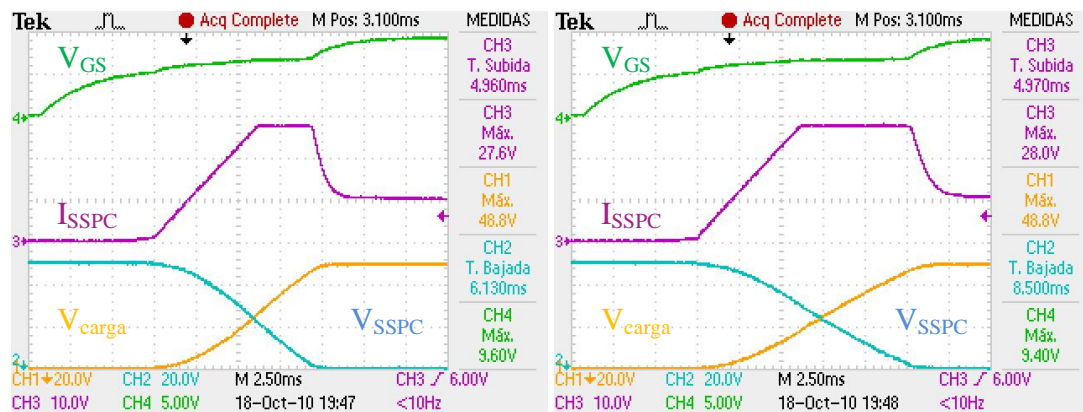


**Figura 6.40:** Control activo generalizado de una carga de  $10\ \Omega$  y  $2270\ \mu\text{F}$  y con corriente máxima  $27,6\ \text{A}$ . Canal 1: Tensión en el SSPC. Canal 2: Tensión en la carga. Canal 3: Corriente por el SSPC. Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{\text{GS}}$ ). Tensión de bus  $100\ \text{V}$

Se observa como para ciertos niveles de corriente por la carga durante el transitorio de conexión, actúa la protección temporal de potencia máxima de la fuente de alimentación, y como consecuencia se limita la tensión del bus y en la carga, ver Figura 6.40.

Con el objetivo de validar las ecuaciones con un mayor rango de tensiones de bus, se han tomado medidas con un bus de tensión de 50 V.

En la Figura 6.41 se muestra la conexión de dos cargas altamente capacitivas mediante control activo generalizado a un bus de 50 V. La primera carga tiene una capacidad de 3600  $\mu\text{F}$  (izquierda) y la segunda incluye una capacidad de 5400  $\mu\text{F}$  (derecha). En ambos transitorios de conexión se observa que la corriente por la carga está controlada en todo momento hasta que se produce la carga del condensador. Para las dos conexiones la corriente máxima está por debajo de 28 A durante todo el periodo de conexión.



**Figura 6.41: Control activo generalizado con una carga de 5  $\Omega$  y 3600  $\mu\text{F}$  (izquierda) y una carga de 5  $\Omega$  y 5400  $\mu\text{F}$  (derecha) con corriente máxima 27,6 A. Canal 1: Tensión en el SSPC ( $V_{\text{SSPC}}$ ). Canal 2: Tensión en la carga ( $V_{\text{carga}}$ ). Canal 3: Corriente por el SSPC ( $I_{\text{SSPC}}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{\text{GS}}$ ). Tensión de bus 50 V**

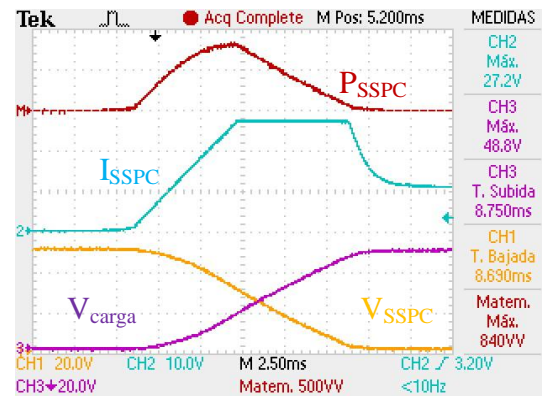
En la Tabla 6.10 se muestra la validación de la expresión (4.105) presentada en el capítulo 4 para el control activo generalizado, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las medidas experimentales presentadas.

Con los datos medidos de corriente nominal, corriente máxima, tensión de bus, tiempo de subida, resistencia y capacidad de carga, y mediante las hojas de cálculo del Anexo A, se obtienen los datos del tiempo de mantenimiento que se conecta de acuerdo a los cálculos teóricos. La capacidad real ha sido medida con el analizador de impedancias [HP4194A]. Con estos dos valores, se evalúa el error cometido, mediante la comparación del valor teórico y experimental del tiempo de conexión con la expresión (4.106), ver Tabla 6.10.

Experimental								Teórico		
$V_{BUS}$ [V]	$I_{MAX}$ [A]	$I_{NOM}$ [A]	$t_s$ [ms]	$C_{Medido}$ [ $\mu F$ ]	$R$ [ $\Omega$ ]	$t_m$ [ms]	$t_c$ [ms]	$t_m$ [ms]	$t_c$ [ms]	Error [%]
100	20,4	10	1,7	216	10	0,7	2,4	0,669	2,368	1,30%
50	27,6	10	6,4	3007	5	3,5	9,9	3,751	10,150	2,53%
50	28	10	6,4	4602	5	6,7	13,1	7,150	13,550	3,44%

**Tabla 6.10: Medidas experimentales vs resultados teóricos del control activo generalizado**

Por otro lado, este procedimiento permite reducir los niveles de potencia máxima disipada en el semiconductor durante los instantes iniciales y permite limitar la potencia máxima disipada en todo momento, ver Figura 6.42.



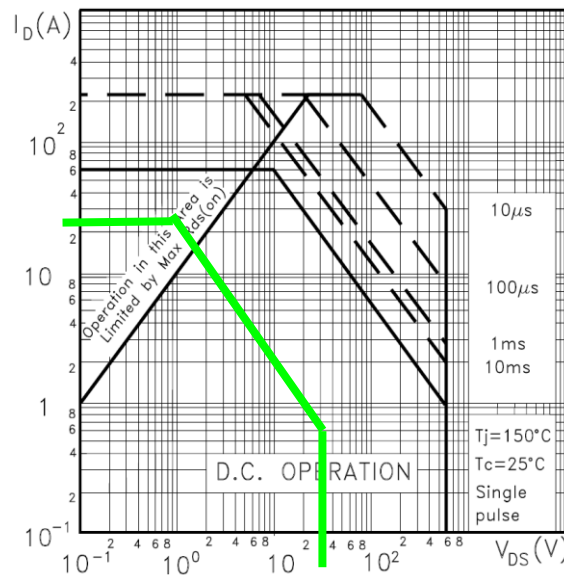
**Figura 6.42: Control activo generalizado con carga de 5  $\Omega$  y 5400  $\mu F$ . Canal 1: Tensión en el SSPC ( $V_{SSPC}$ ). Canal 2: Corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ). Canal 3: Tensión en la carga ( $V_{carga}$ ). Canal M: Potencia disipada por el SSPC. Tensión de bus 50 V**

De los resultados experimentales se puede concluir que el procedimiento de conexión generalizado, permite reducir los tiempos de conexión y el límite máximo de corriente que circula por el SSPC, durante el transitorio de conexión. Este procedimiento activo combina las ventajas de los dos métodos activos anteriores, disminuye la disipación inicial en el semiconductor y con ello el estrés térmico en comparación con el primero de

los controles activos; y en segundo lugar, reduce los tiempos del transitorio de conexión si se compara con el segundo método de conexión activo con derivada constante de la corriente.

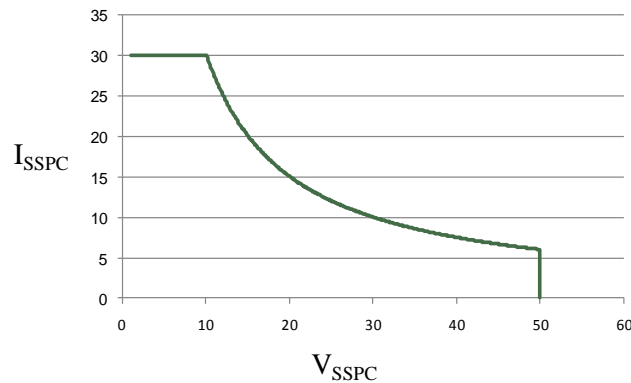
### 6.3.5 Resultados experimentales del control activo por trayectoria óptima de la corriente

Una vez realizada la validación del control activo generalizado, es posible comprobar la funcionalidad de la estrategia de control activo por control de la trayectoria óptima de la corriente. Este control activo, a diferencia con los anteriores métodos presentados, tiene en cuenta las limitaciones de funcionamiento del semiconductor (MOSFET, IGBT, etc.) incluidas en la SOA, ver Figura 6.43.



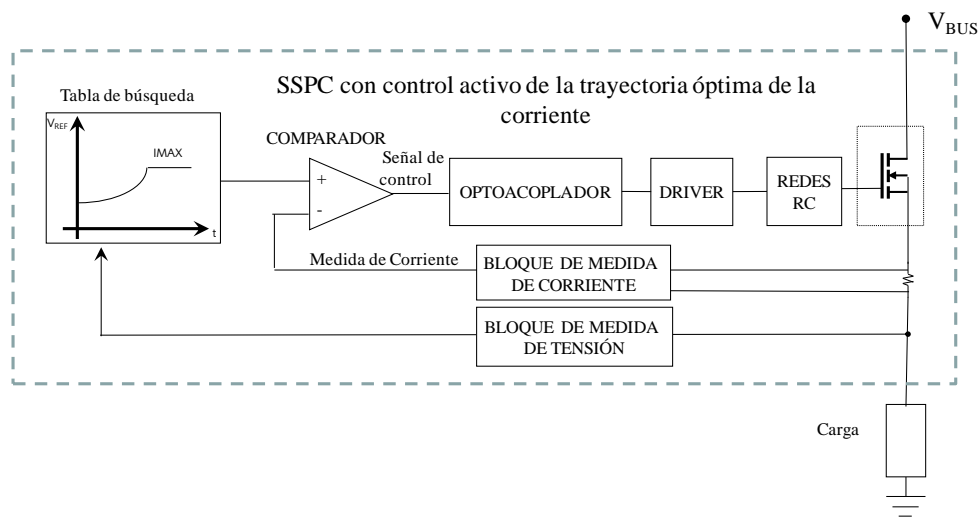
**Figura 6.43: Área de Operación Segura (SOA) del MOSFET, modelo STY60NM50**

Es importante señalar que en los ensayos se ha limitado la SOA a 300 W, con el objetivo de evitar perturbaciones en la tensión de bus producidas por la fuente de alimentación del laboratorio, marcada con línea verde en la Figura 6.43.



**Figura 6.44: Niveles de SOA programada**

De este modo, durante el transitorio de conexión de la carga altamente capacitiva, el SSPC sigue el límite de la zona de operación segura del semiconductor ó SOA, que para este caso corresponde a la de un MOSFET. Con el objetivo de ajustar el transitorio de conexión a la SOA del semiconductor, el microcontrolador mide la tensión de la carga. Con la tensión de la carga, teniendo en cuenta los datos del SOA programada, Figura 6.44, y en función de la tensión del bus, el microcontrolador impone una señal de referencia que regula la carga del condensador de puerta  $C_g$ , ver Figura 6.45.



**Figura 6.45: Detalle del diagrama de control del SSPC para el control activo por trayectoria óptima de la corriente**



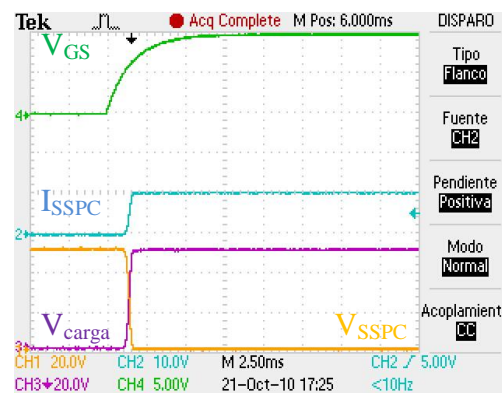
Para ello, la señal de referencia generada por el microcontrolador se compara con la corriente medida, de forma que, el comparador genera los pulsos de disparo del driver que cargan y descargan  $C_g$  y regulan la tensión de control del MOSFET, ver Figura 6.45.

Para validar las ecuaciones con una mayor precisión se han tomado medidas en un bus de tensión de 50 V, para este caso la tensión de bus permanece prácticamente constante. Las especificaciones de los parámetros de conexión están incluidas en la Tabla 6.11

Parámetro	Teórica
Tensión de Bus	50 V
Corriente Nominal	$I_N = 10 \text{ A}$
Corriente Máxima	$I_{MAX} = 50 \text{ A}$
Resistencia de carga	$5 \Omega$
Condensadores de carga	1800 $\mu\text{F}$ , 5400 $\mu\text{F}$

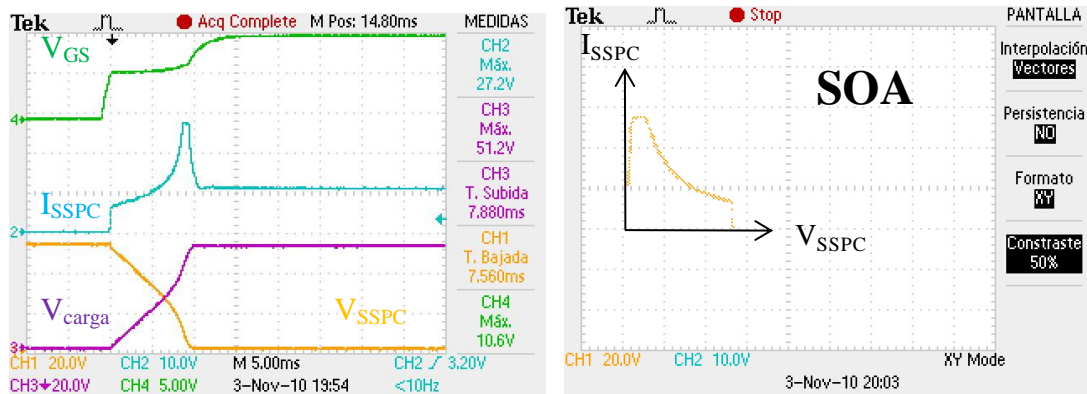
**Tabla 6.11: Especificaciones de conexión del SSPC con control activo por trayectoria óptima de la corriente**

Inicialmente conectamos una carga resistiva mediante el control óptimo de la trayectoria de la corriente, ver Figura 6.46. Las formas de onda son prácticamente iguales al control activo con corriente constante.



**Figura 6.46: Control activo por trayectoria óptima de la corriente con carga de  $5 \Omega$ . Canal 1: Tensión en el SSPC ( $V_{SSPC}$ ). Canal 2: Corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ). Canal 3: Tensión en la carga ( $V_{carga}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{GS}$ ). Tensión de bus 50 V**

En la Figura 6.47 (izquierda) se muestra la conexión de una carga altamente capacitiva con una capacidad de  $1800\ \mu\text{F}$ . Por otro lado, en la Figura 6.47 (derecha) se muestra la representación XY, de la corriente por el SSPC con respecto a la tensión que soporta el SSPC, de forma que se puede comprobar cómo la corriente y tensión soportadas por el MOSFET se ajustan a la SOA programada, Figura 6.44.

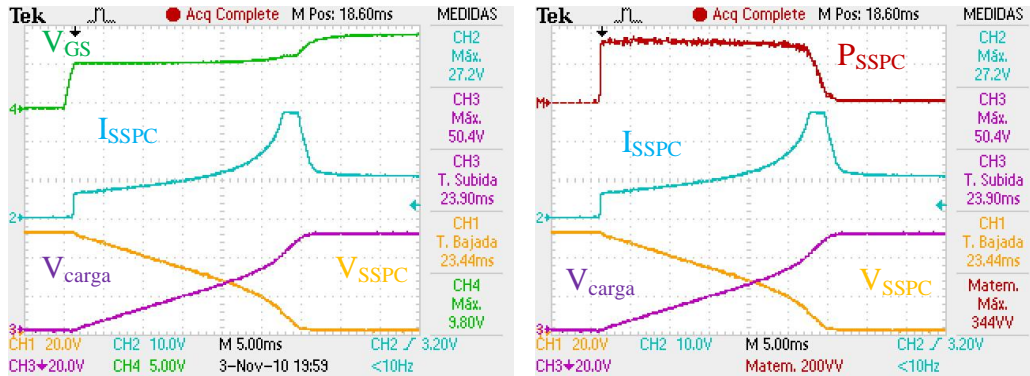


**Figura 6.47: Control activo por trayectoria óptima de la corriente con carga de  $10\ \Omega$  y  $1800\ \mu\text{F}$  en el tiempo (izquierda) y en XY (CH1-CH2) (derecha). Canal 1: Tensión en el SSPC ( $V_{SSPC}$ ). Canal 2: Corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ). Canal 3: Tensión en la carga ( $V_{carga}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{GS}$ ). Tensión de bus 50 V**

Durante la conexión de una carga muy capacitiva de  $5400\ \mu\text{F}$ , se puede apreciar que en todo momento se optimiza el estado del semiconductor, ya que se ajusta a la potencia máxima escalada del semiconductor, reduciendo los tiempos de conexión y sin llegar a dañar el MOSFET, ver Figura 6.48 (izquierda).

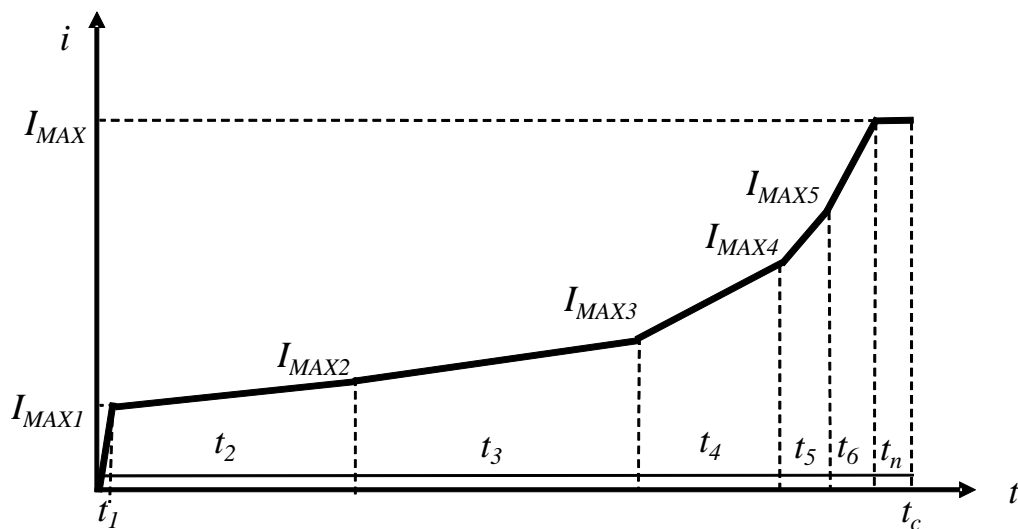
Por otro lado, en la Figura 6.48 (derecha) se muestra la representación de la potencia disipada en el SSPC durante el transitorio de conexión.

En las Figura 6.47 y Figura 6.48 se puede apreciar que durante la conexión de dos cargas altamente capacitivas con distintos condensador mediante control óptimo de la trayectoria de la corriente, en ambos casos la representación de la corriente en función de la tensión soportada por el SSPC se ajusta a la curva de la SOA programada, ver Figura 6.44.



**Figura 6.48: Control activo por trayectoria óptima de la corriente con carga de  $10\ \Omega$  y  $5400\ \mu F$ . Canal 1: Tensión en el SSPC ( $V_{SSPC}$ ). Canal 2: Corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ). Canal 3: Tensión en la carga ( $V_{carga}$ ). Canal 4: Tensión en la puerta del semiconductor ( $V_{GS}$ ). Canal M: Potencia disipada por el SSPC. Tensión de bus 50 V**

La principal ventaja de esta solución es que para cargas resistivas el sistema se comporta como un interruptor mediante control por corriente constante, y solo para cargas capacitivas se adaptaría la conexión para evitar los picos de corriente en el SSPC, limitándolo más cuanto más capacitiva sea la carga. Además, se aprovecha de forma notable las capacidades de los semiconductores. También, se aprovecha el semiconductor en mayor medida debido a que disipa en todo el transitorio de conexión la máxima potencia que le es posible.



**Figura 6.49: Representación lineal de la corriente por el SSPC**

Con el objetivo de validar los cálculos teóricos y aplicar la ecuación (4.125), es necesario hacer lineal por tramos la evolución de la corriente mediante rampas, ver Figura 6.49. En este caso se han utilizado cinco y seis rampas respectivamente, ver Tabla 6.12. A partir de los datos presentados en la Tabla 6.12 se valida la expresión (4.125).

Teniendo en cuenta los valores de corriente nominal, tensión de bus, resistencia y capacidad de carga reales, además de los tiempos de subida y corrientes máximas en cada uno de los tramos, se pueden obtener mediante una hoja Excel los datos del tiempo de conexión necesario para conectar la carga altamente capacitiva, de acuerdo a los cálculos teóricos. La capacidad real ha sido medida con el analizador de impedancias [HP4194A]. El error cometido se evalúa mediante la comparación del valor teórico y experimental del tiempo de conexión, expresión (4.128). Es importante señalar que el error cometido está por debajo del 0,5%.

Experimental											Teórico		
$V_{BUS}$ [V]	$I_{NOM}$ [A]	$t_1$ [ms]/ $I_{MAX1}$ [A]	$t_2$ [ms]/ $I_{MAX2}$ [A]	$t_3$ [ms]/ $I_{MAX3}$ [A]	$t_4$ [ms]/ $I_{MAX4}$ [A]	$t_5$ [ms]/ $I_{MAX5}$ [A]	$t_6$ [ms]/ $I_{MAX6}$ [A]	$C_{Medido}$ [mF]	$t_n$ [ms]	$t_c$ [ms]	$t_n$ [ms]	$t_c$ [ms]	Error [%]
50	10	0,15/ 6,6	8/ 9,2	2,5/ 12,5	0,45/ 15,7	0,945/ 27,2	-	1,592	1	13,045	0,95	12,995	0,38%
50	10	0,15/ 6,6	8,9/ 8,35	10/ 12,01	5/ 16,71	1,5/ 20,71	1/ 27,2	4,431	2	28,55	1,95	28,5	0,18%

**Tabla 6.12: Medidas experimentales vs resultados teóricos del control activo por trayectoria óptima de la corriente**

Una vez analizados los resultados se puede concluir, que el procedimiento por control activo de la trayectoria óptima de la corriente es el que más se ajusta a las capacidades del semiconductor principal del SSPC, en este caso el MOSFET. Por ello se optimiza el diseño, al permitir limitar la corriente máxima en función de la tensión que soporta la carga. Por el contrario, este procedimiento resulta más complejo ya que requiere de la medida y procesado de la tensión y la corriente en el SSPC durante el transitorio.

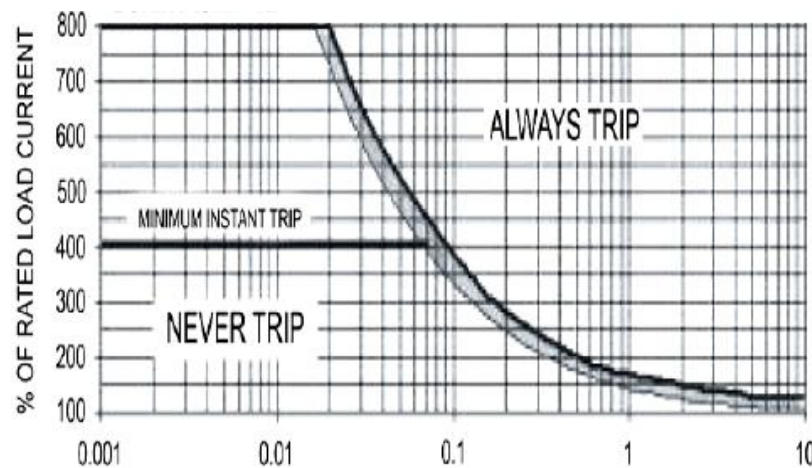
## 6.4 Resultados experimentales de la activación de las protecciones

El prototipo de SSPC también incluye las protecciones por sobrecorriente y la protección basada en la curva  $I^2t$  de los circuitos magnetotérmicos convencionales. En los siguientes apartados se muestran los resultados experimentales durante la activación de estas protecciones.

### 6.4.1 Validación experimental de la curva $I^2t$

Con el objetivo de validar el funcionamiento de la curva  $I^2t$  y teniendo en cuenta la instrumentación del laboratorio durante las pruebas del prototipo, las medidas se han realizado con diferentes niveles de tensión dependiendo del nivel de corriente que se requiere en la carga, para adaptarse a la carga programable disponible.

En la Figura 6.50 se muestra la curva  $I^2t$  del SSPC fabricado por Sensitron, la cual ha servido de referencia para la programación del microcontrolador y la realización de los resultados experimentales.

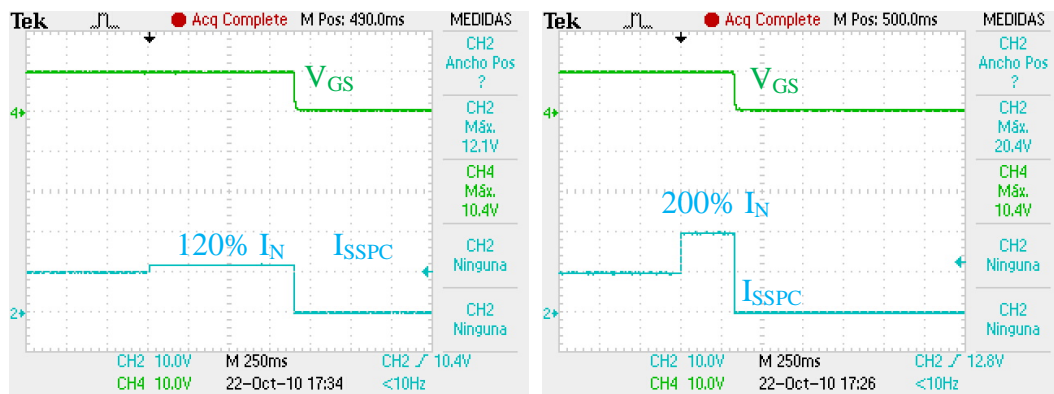


**Figura 6.50: Curva  $I^2t$  incluida en el SSPC fabricado por Sensitron® y en el prototipo desarrollado**

En todas las medidas realizadas para la validación experimental de la curva  $I^2t$ , se muestra la señal de control y la corriente por el SSPC.

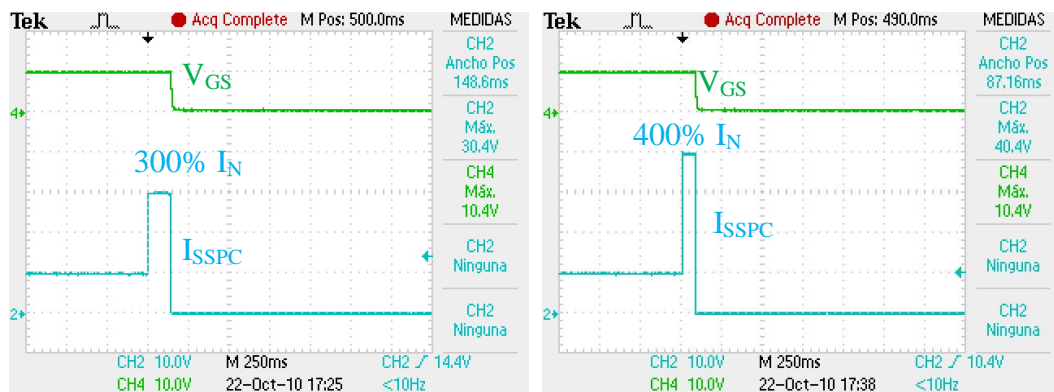
#### 6.4.1.1 Validación de la curva $I^2t$ clásica mediante sobrecorriente constante

En las Figura 6.51 y Figura 6.52 se muestran los resultados experimentales obtenidos con el prototipo de SSPC desarrollado, durante la activación de la protección por la curva  $I^2t$ . Para ello se ha aplicado una sobrecorriente constante. De este modo, se puede comprobar cómo los tiempos de activación de la protección  $I^2t$ , para corrientes 120% y 200%, Figura 6.51, se corresponden con la curva del fabricante Sensitron, ver Tabla 6.13.



**Figura 6.51:** Medida real de la corriente y de la señal de control del SSPC durante la activación de la protección  $I^2t$ , para un nivel de corriente de 12 A (izquierda) y 20 A (derecha)

En la Figura 6.52, se ha incrementado el nivel de sobrecorriente hasta el 300% y 400% de la corriente nominal, ver Tabla 6.13.



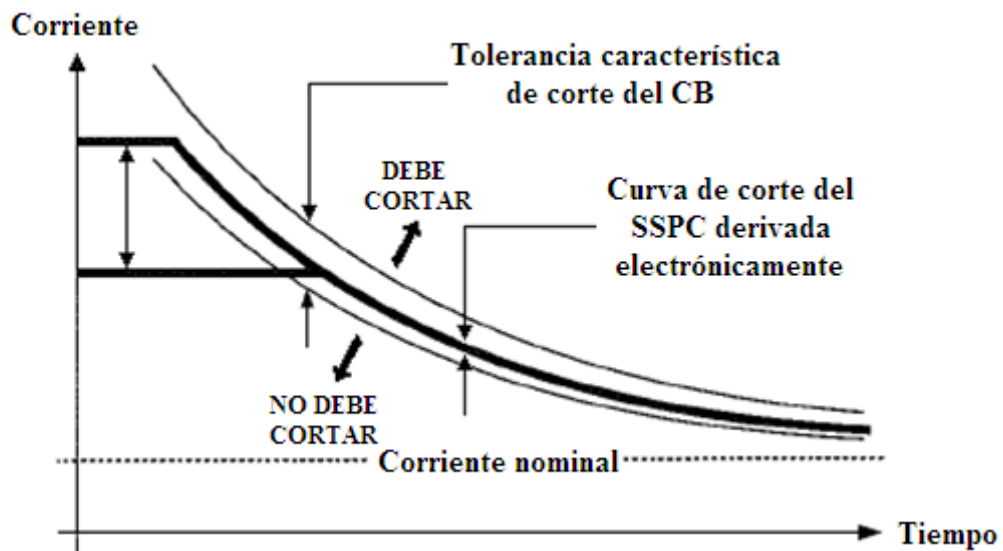
**Figura 6.52:** Medida real de la corriente y de la señal de control del SSPC durante la activación de la protección  $I^2t$ , para un nivel de corriente de 30 A (izquierda) y 40 A (derecha)

Para estos niveles de corriente se puede verificar cómo los tiempos de activación están dentro de los rangos del SSPC fabricado por Sensitron, ver Tabla 6.13.

Nivel de Corriente (A)	Tiempo de activación (ms)	
	SSPC Sensitron	Medida Experimental
12	900-2000	910
20	300-500	345
30	140-180	145
40	70-100	100

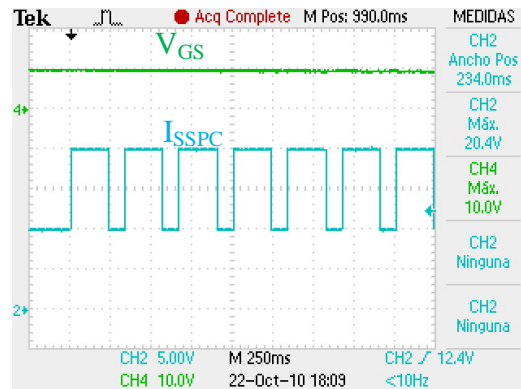
**Tabla 6.13: Tiempos de activación de la curva  $I^2t$**

Una de las principales ventajas de la programación de la curva  $I^2t$  es la precisión que se consigue respecto de los tiempos de activación de la protección. A diferencia de los CB, esto permite reducir la zona de incertidumbre, que para bajos niveles de corriente supone una notable diferencia en los tiempos de activación, ver Figura 6.53.



**Figura 6.53: Comparativa de los tiempos de activación de la protección  $I^2t$  en SSPC y CB**

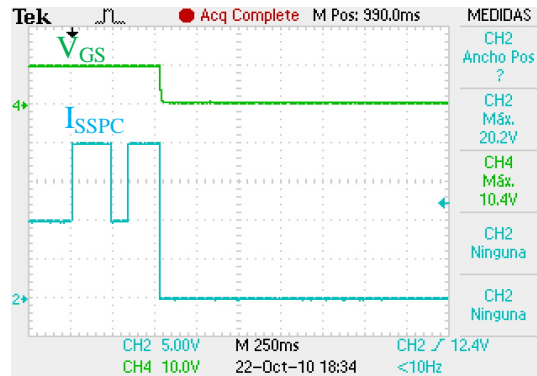
En el primer ensayo, se conecta un SSPC programado con la curva  $I^2t$  de la Figura 6.50, con una carga resistiva inicial de 10 A. Cuando se activa la carga programable, la cual demanda un nivel de corriente adicional de 10 A, consiguiendo una variación entre 10 A (30% del tiempo) y 20 A (70% del tiempo), se puede apreciar como la protección  $I^2t$  no actúa y mantiene la conexión con la carga, ver Figura 6.54, incluso cuando se alcanzan los límites donde la potencia disipada por el cable está fuera de rangos.



En el segundo ensayo se programa el microcontrolador con la misma curva  $I^2t$  e incluyendo el efecto de la memoria térmica, y se somete al SSPC a la misma carga pulsante que en el ensayo anterior, pulsos de 10 A (30% del tiempo), a 20 A (70% del tiempo). Se puede comprobar como para los tiempos de activación de una corriente de 20

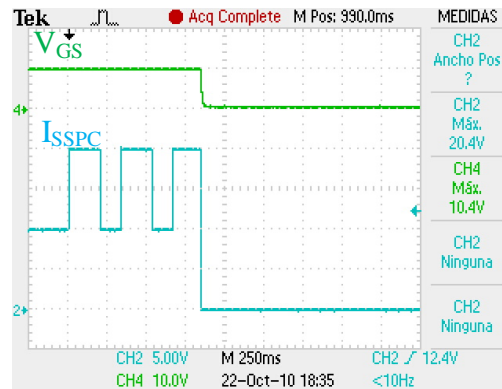


A, la protección actúa después de dos pulsos de corriente, debido a la acumulación del efecto del calentamiento del cable.



**Figura 6.55: Carga resistiva programable conectada mediante un SSPC con memoria térmica (30-70%)**

Una tercera medida se ha realizado con una carga pulsante en la cual se ha variado la duración de los pulsos 10 A (40% del tiempo) y 20 A (60% del tiempo) amperios, para este caso los tiempos de activación son más lentos que en el caso anterior. La protección actúa después de tres pulsos de corriente, debido a que la acumulación del efecto del calentamiento del cable es más lenta.

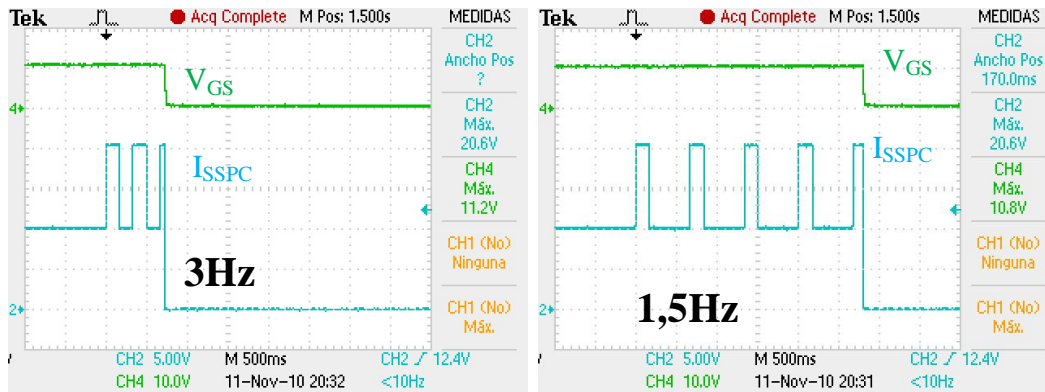


**Figura 6.56: Carga resistiva programable conectada mediante un SSPC con memoria térmica (40-60%)**

#### 6.4.1.3 Validación del efecto de disipación térmica en los cables en la curva $I^2t$

Como se ha descrito en el capítulo 5 otro de los efectos que el SSPC debe de tener en cuenta es la disipación térmica de los cables.

Con el objetivo de validar la implementación realizada se ha sometido al cable, protegido mediante SSPC, a pulsos de corrientes de igual amplitud (10 A y 20 A) y duración (167 milisegundos) pero con diferente frecuencia (3 Hz y 1,5 Hz) de repetición, ver Figura 6.57.



**Figura 6.57: Carga resistiva programable conectada con SSPC con memoria térmica, ensayos del efecto de la disipación del cable**

Como se puede observar para pulsos de corriente de igual amplitud pero con distintas frecuencias, el cable se calienta antes para el caso en el que la frecuencia es mayor, debido al mayor número de repeticiones de las sobrecorrientes. Como consecuencia la protección por sobrecorriente actúa 2 segundos después que en el ejemplo con la frecuencia menor, debido a que el enfriamiento del cable es tenido en cuenta en el algoritmo incluido en la protección, ver Figura 6.57.

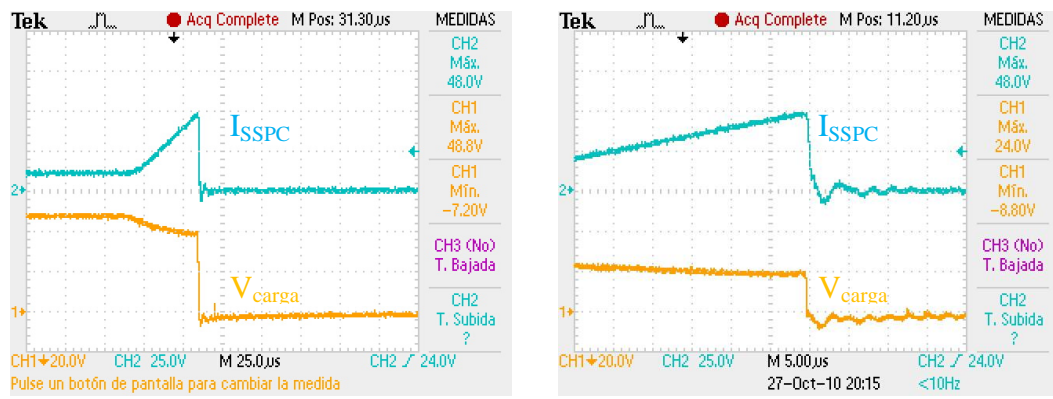
#### 6.4.2 Protección contra sobrecorriente 480% de la corriente nominal

Además, de la protección por la curva  $I^2t$ , el prototipo de SSPC tiene incorporada una protección instantánea que limita la corriente máxima que puede llegar a la carga, independientemente de la  $I^2t$ , ver Figura 6.58.

La activación de la protección se realiza mediante el bloque 2, ver apartado 6.2.2, a través de la descarga del condensador  $C_g$  mediante el transistor bipolar, que está controlado directamente por el microcontrolador.

Como se puede observar, los tiempos de activación están por debajo de los 3 microsegundos, para diferentes valores de tensión. El valor máximo, por cuestiones de diseño, se ha fijado en 48 A, aunque es programable y está condicionado por un nivel de referencia impuesto por el microcontrolador.

En la Figura 6.58 se muestra el mismo transitorio de activación de esta protección por sobrecorriente para un nivel de 48 A, con diferente escala de tiempos, 25 microsegundos (izquierda) y 5 microsegundos (derecha).



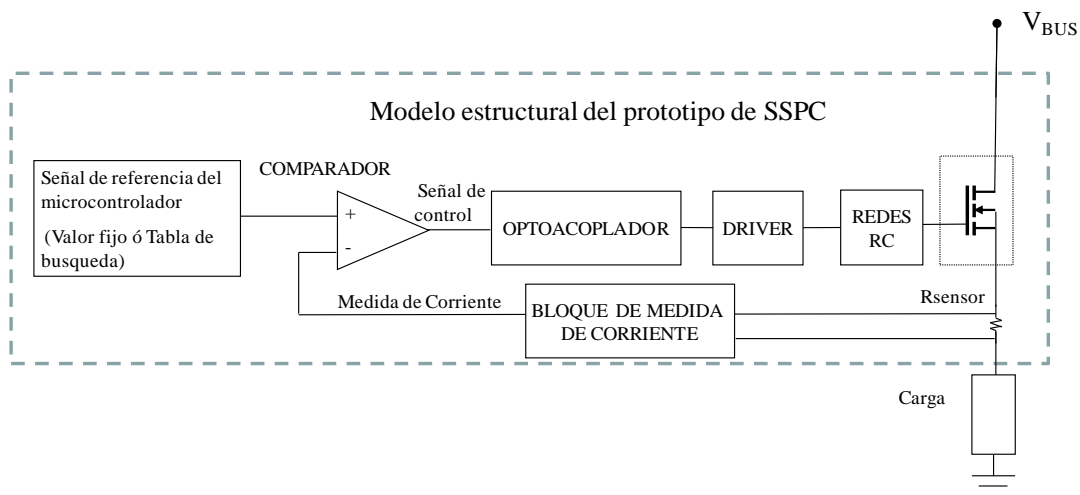
**Figura 6.58: Validación de la prueba experimental de la protección contra sobrecorriente  $I > 48$  A del SSPC controlada por el microcontrolador. Canal 1: Tensión en la carga ( $V_{carga}$ ). Canal 2: Corriente por el SSPC ( $I_{SSPC}$ ).**

## 6.5 Modelado estructural del prototipo

Una vez desarrollado y probado el prototipo se ha realizado el modelado del dispositivo, para lo cual se ha utilizado el modelo estructural presentado en el capítulo 5. Con este modelo se han simulado y reproducido los diferentes transitorios durante la conexión de las cargas. A partir de estos resultados experimentales se ha validado el modelo generado con la herramienta de simulación [PSIM] ®.

En este apartado se han validado las siguientes estrategias de conexión: control pasivo de la corriente del SSPC, control activo con derivada constante de la corriente, control activo con corriente constante, control activo generalizado y control óptimo de la trayectoria de la corriente.

El modelo estructural está basado en la estructura del dispositivo y coincide con el presentado en el capítulo 5. Únicamente, se ha modificado el bloque encargado de generar la señal de control, dependiendo de la estrategia de control modelada, y se ha incluido las redes RC que permiten el control de la tensión de puerta del MOSFET, ver Figura 6.59.



**Figura 6.59: Modelo estructural del prototipo**

Para evitar errores ajenos al modelo generado, por limitación de las fuentes de alimentación disponibles, y que el modelado se ajuste perfectamente a los datos reales, ha

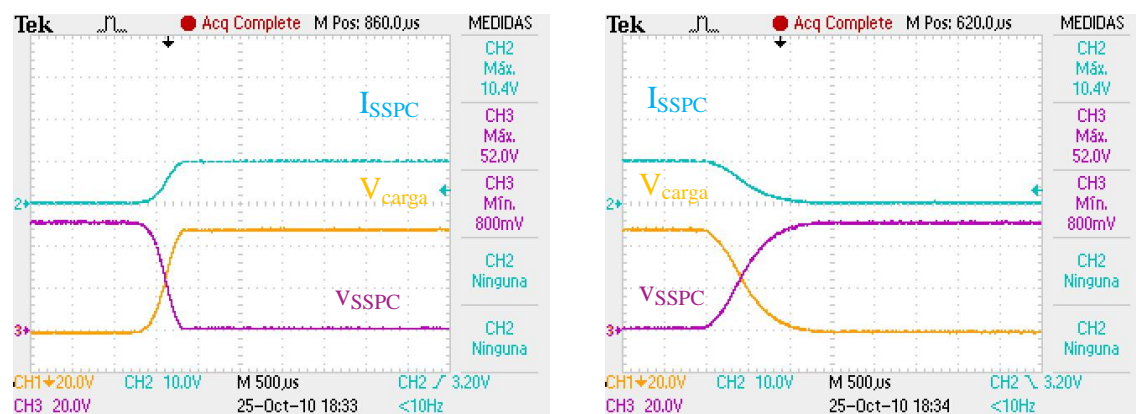
sido necesario realizar las medidas con un bus de 50 V. Por otro lado, todas las resistencias y condensadores de las diferentes cargas han sido medidos con el analizador de impedancias [HP4194A] e introducidos en el banco virtual en PSIM.

Para los procedimientos de control activo, el valor de la resistencia,  $R_{gOFF}$ , encargada de la descarga de  $C_g$  se mantiene fija, por lo cual en la validación del modelo únicamente se simulan los resultados de desconexión del SSPC en el método de control pasivo. Así pues, al igual que el apartado anterior, para los procedimientos de control activo las simulaciones se centrarán en las formas de onda durante el transitorio de la conexión del SSPC.

### 6.5.1 Modelado del control pasivo

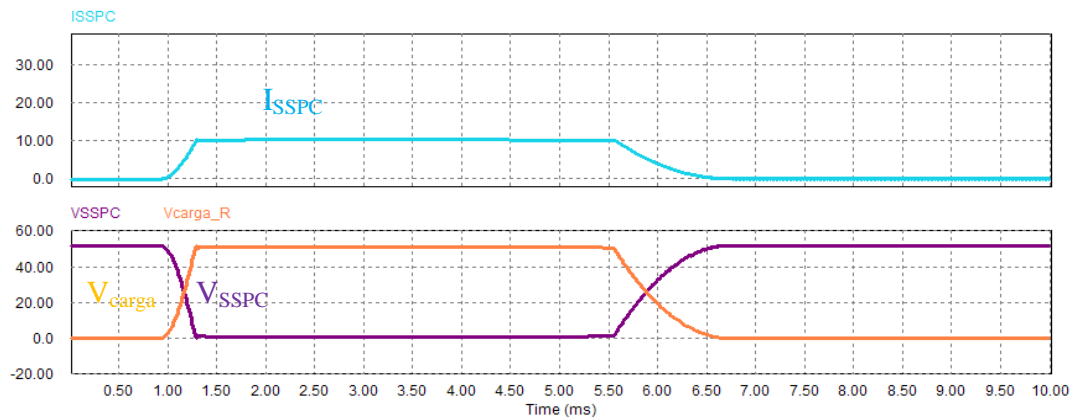
En el modelado del control pasivo se han tenido en cuenta los valores de las resistencias que condicionan la carga y la descarga del condensador  $C_g$ . Para validar este modelo, se ha simulado un control pasivo de acuerdo con las condiciones de carga de los resultados experimentales anteriormente presentados. En el control pasivo el driver únicamente recibe una señal de encendido ó apagado.

Inicialmente, se valida la simulación de las medidas reales durante la conexión (izquierda) y la desconexión (derecha) de una carga resistiva, ver Figura 6.60.



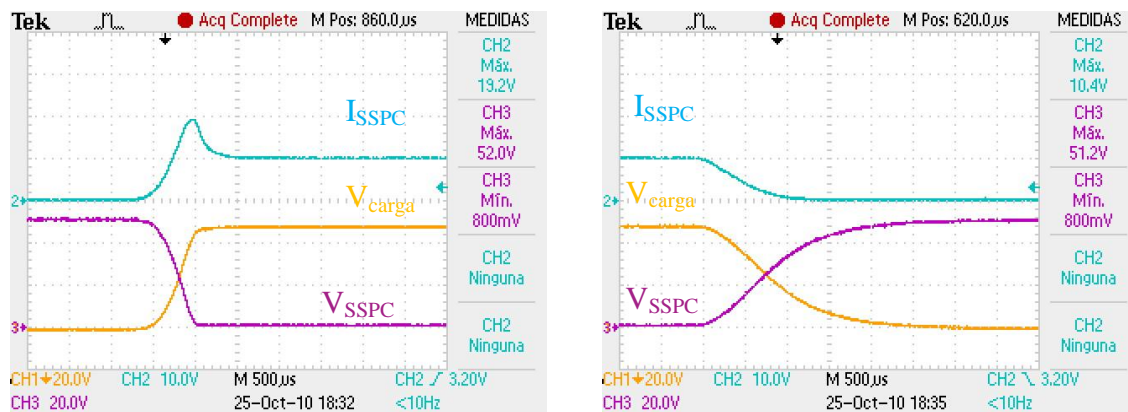
**Figura 6.60:** Control pasivo con  $R_{gON}=2,2\text{ k}\Omega$ ,  $R_{gOFF}=6,8\text{ k}\Omega$  y  $C_g=680\text{ nF}$  y con carga resistiva de  $5\text{ }\Omega$ . Canal 1: Tensión en la carga. Canal 2: Corriente por el SSPC. Canal 3: Tensión en el SSPC

Así pues, con el modelo de SSPC configurado de acuerdo con los parámetros internos del componente, se puede verificar que el modelo realizado en PSIM reproduce el comportamiento del SSPC, ver Figura 6.61. Como se puede comprobar en la simulación, los tiempos de subida y bajada de la corriente durante la simulación del modelo de SSPC, corresponden con los tiempos de las medidas sobre el prototipo, ver Figura 6.60 y Figura 6.61.



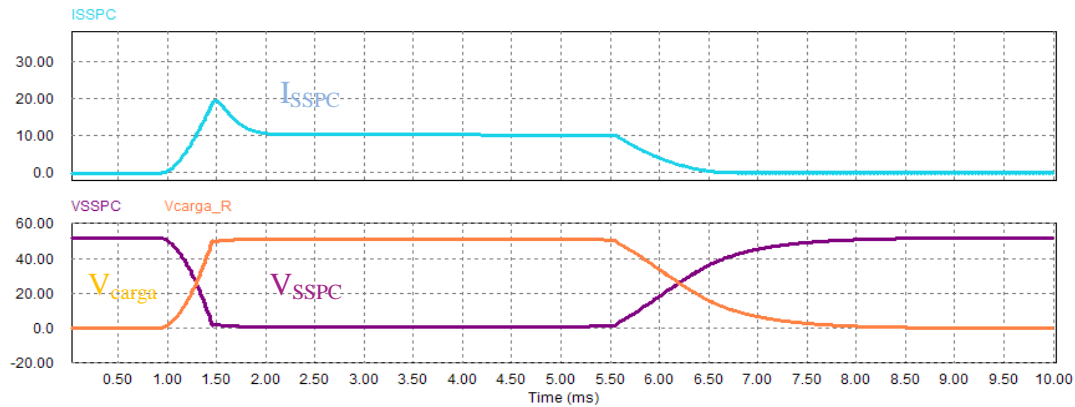
**Figura 6.61: Resultados de simulación del modelo del control pasivo con  $R_{GON}=2,2$  k $\Omega$ ,  $R_{GOFF}=6,8$  k $\Omega$  y  $C_g=680$  nF y con carga resistiva de 5  $\Omega$**

En la Figura 6.62 se recoge las medidas reales durante la conexión (izquierda) y desconexión (derecha) de una carga con carácter capacitivo de 5  $\Omega$  y 100  $\mu$ F.



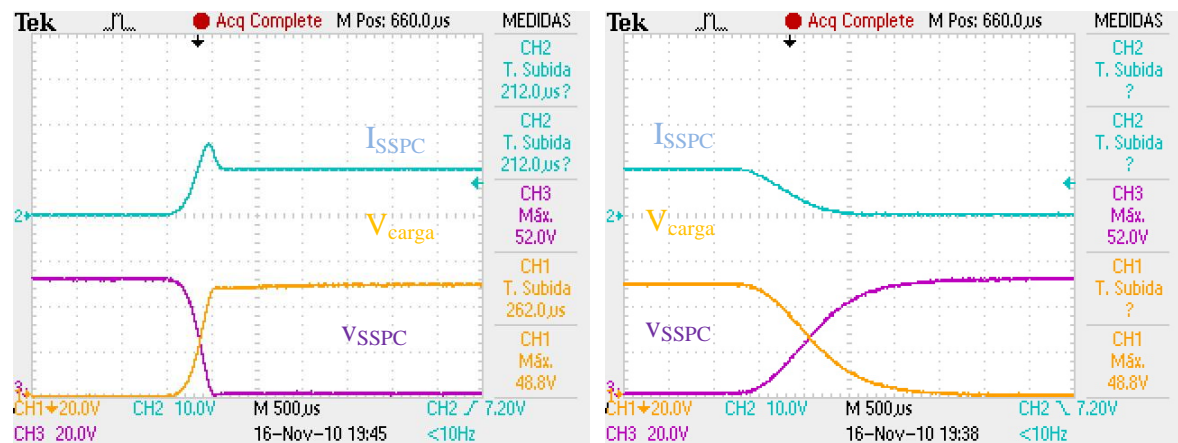
**Figura 6.62: Control Pasivo con  $R_{GON}=2,2$  k $\Omega$ ,  $R_{GOFF}=6,8$  k $\Omega$  y  $C_g=680$  nF, durante la conexión ( $\tau_{GS\_ON}=1,5$  ms) y la desconexión ( $\tau_{GS\_OFF}=4,6$  ms) de una carga 5  $\Omega$  y 100  $\mu$ F, a un bus de 50 V. Canal 1: Tensión en la carga. Canal 2: Corriente por el SSPC. Canal 3: Tensión en el SSPC**

Como se puede apreciar en la Figura 6.63, para el mismo valor de resistencia y capacidad de carga y con el modelo de SSPC del ejemplo anterior, se comprueba como la simulación se comporta igual que en los resultados experimentales. En el transitorio de conexión se alcanzan casi 20 A de corriente máxima al igual que en los resultados experimentales. Además, los tiempos de conexión y desconexión son muy similares.



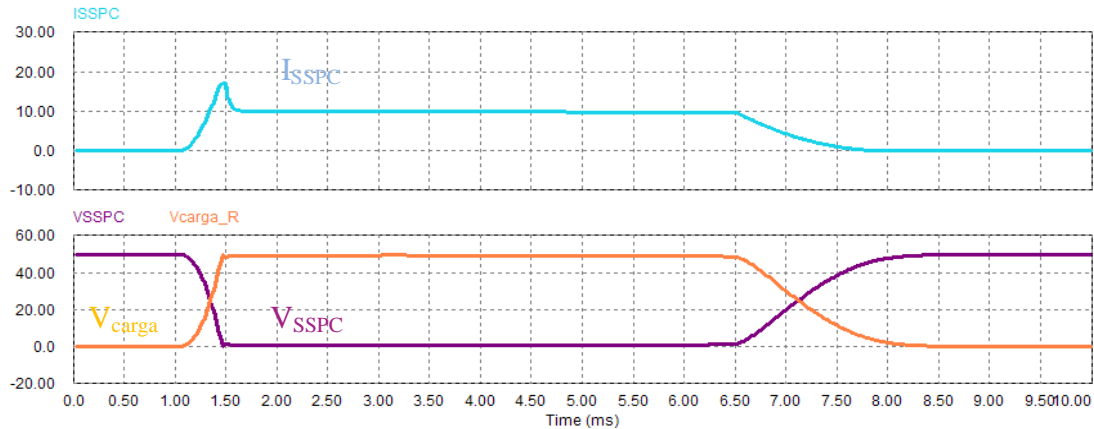
**Figura 6.63: Resultados de simulación del modelo del SSPC con control Pasivo con  $R_{gON}=2,2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{gOFF}=6,8 \text{ k}\Omega$  y  $C_g=680 \text{ nF}$  ( $\tau_{GS\_ON}=0.680 \text{ ms}$ ), durante la conexión y la desconexión de una carga capacitiva de  $5 \text{ }\Omega$  y  $100 \text{ }\mu\text{F}$**

En la Figura 6.64 se muestran las medidas reales con una carga de  $5 \text{ }\Omega$  y  $47 \text{ }\mu\text{F}$ .



**Figura 6.64: Control Pasivo con  $R_{gON}=2,2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{gOFF}=6,8 \text{ k}\Omega$ ,  $C_g=680 \text{ nF}$  durante la conexión y la desconexión de una carga capacitiva  $5 \text{ }\Omega$  y  $47 \text{ }\mu\text{F}$ , a un bus de  $50 \text{ V}$ . Canal 1: Tensión en la carga. Canal 2: Corriente por el SSPC. Canal 3: Tensión en el SSPC**

En la Figura 6.65 se puede apreciar como los valores de corriente máxima alcanzada, los tiempos de apagado y encendido con el modelo del SSPC son prácticamente iguales que en las medidas reales.



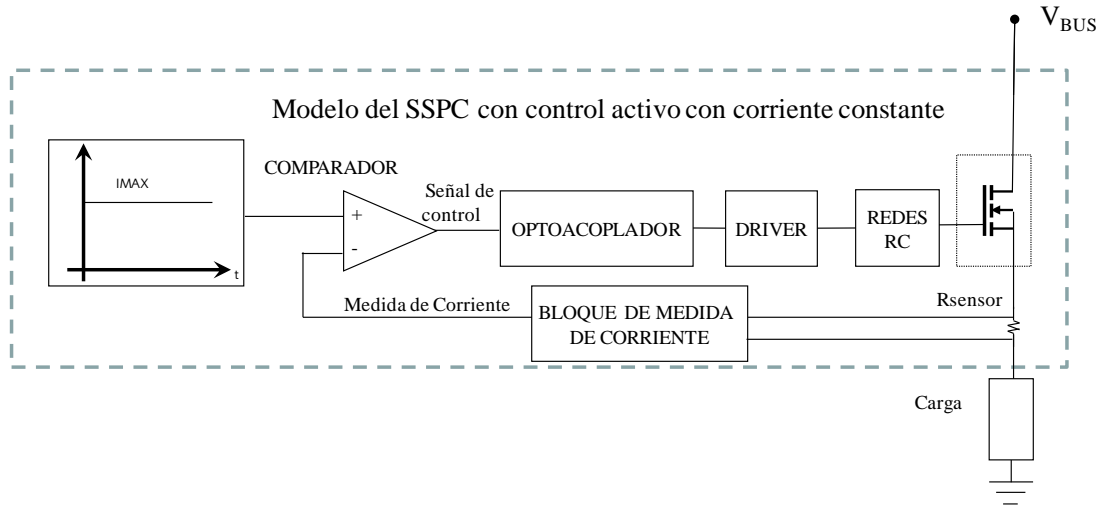
**Figura 6.65: Resultados de simulación del modelo con control Pasivo con  $R_{gON}=2,2\text{ k}\Omega$ ,  $R_{gOFF}=6,8\text{ k}\Omega$ ,  $C_g=680\text{ nF}$  durante la conexión y la desconexión de una carga capacitiva de  $5\text{ }\Omega$  y  $47\text{ }\mu\text{F}$**

De las simulaciones realizadas con el modelo de SSPC configurado con el control pasivo se puede concluir, que el modelo reproduce la evolución de la corriente en los valores máximos y duración del transitorio, así como, los valores de la tensión que soporta el SSPC y la carga, para diferentes valores de carga con carácter capacitivo.

### 6.5.2 Modelado del control activo con corriente constante

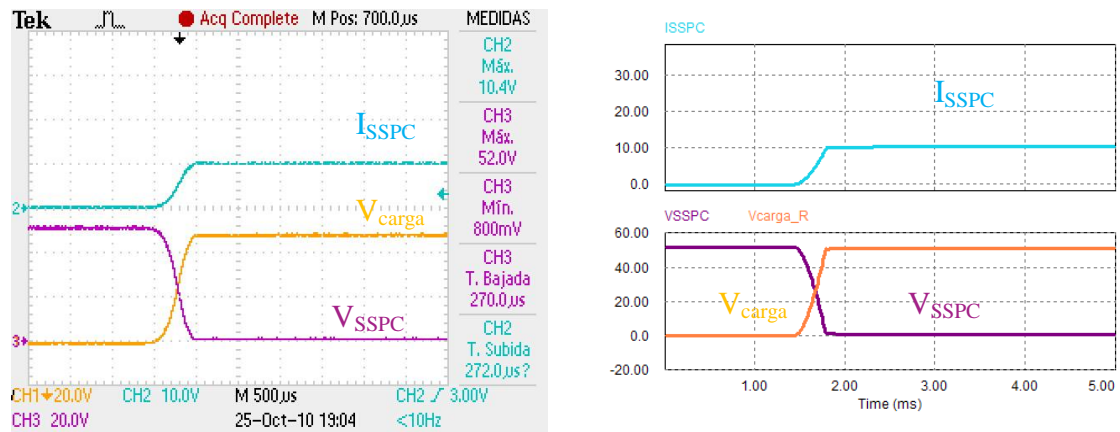
Una vez realizado el modelado con la estructura descrita en el capítulo 5, se ha simulado un control activo con corriente constante. Para ello, únicamente se cambia la señal de referencia procedente del microcontrolador, que le llega al comparador, por un nivel constante, en este caso de  $20\text{ V}$ , con el que se fija el nivel máximo de la corriente del modelo de SSPC, ver Figura 6.66. El modelo únicamente se configura una vez independientemente de la carga que se conecte.





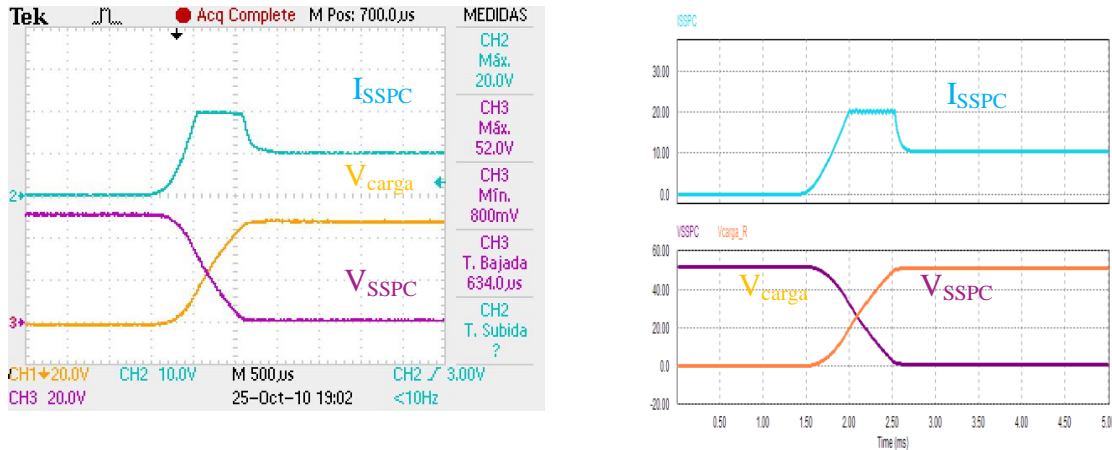
**Figura 6.66: Modelo estructural del prototipo con control activo con corriente constante**

En la Figura 6.67 se muestran la verificación del modelo con resultados obtenidos mediante el control activo por corriente constante con una carga resistiva pura. Como se puede apreciar los tiempos de conexión, niveles de corriente y tensión son muy similares.



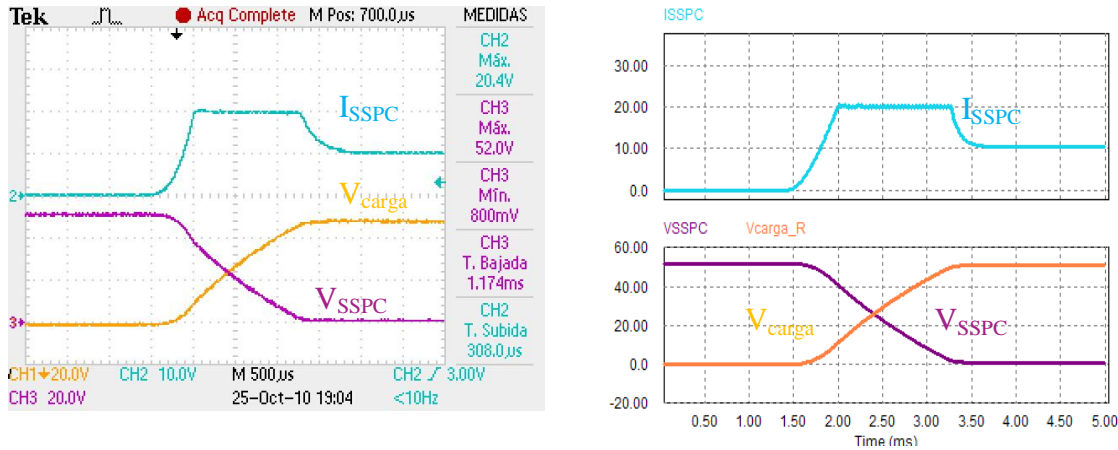
**Figura 6.67: Medidas experimentales y resultados de simulación del modelo de control activo con corriente constante con una carga de  $5\ \Omega$  y una corriente máxima programada de 20 A**

En la Figura 6.68 se muestra el transitorio de conexión real y simulada de una carga de tipo capacitivo, con una capacidad de  $220\ \mu\text{F}$ , mediante control activo con corriente constante. Se puede observar que en ambos casos la corriente máxima está fijada en 20 A y el tiempo de mantenimiento es muy similar.



**Figura 6.68:** Medidas experimentales y resultados de simulación del modelo de control activo con corriente constante con una carga de  $10 \Omega$  y  $220 \mu\text{F}$ , y una corriente máxima programada de 20 A

Con una carga altamente capacitiva de  $470 \mu\text{F}$ , se comprueba como aumenta el tiempo de mantenimiento para las medidas experimentales y de simulación del modelo de SSPC, ver Figura 6.69.

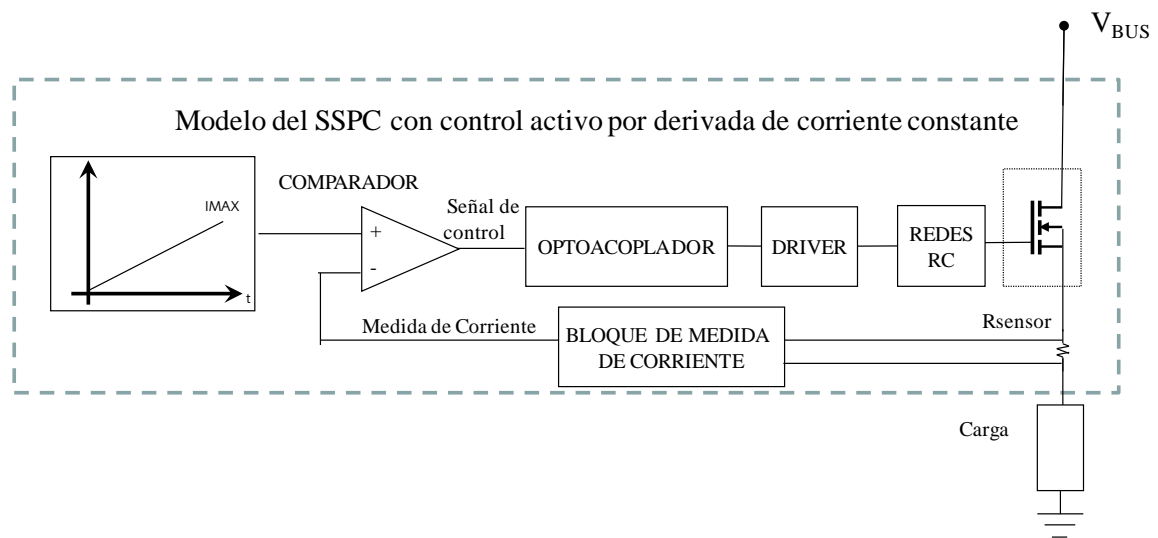


**Figura 6.69:** Medidas experimentales y resultados de simulación del modelo de control activo con corriente constante con una carga de  $10 \Omega$  y  $470 \mu\text{F}$ , y una corriente máxima programada de 20 A

Al igual que con el control pasivo, y teniendo en cuenta las simulaciones del modelo de SSPC realizadas con control activo con corriente constante, se puede concluir que el modelo reproduce la evolución de la corriente y la tensión que soporta el SSPC, para las diferentes cargas resistivas y capacitivas.

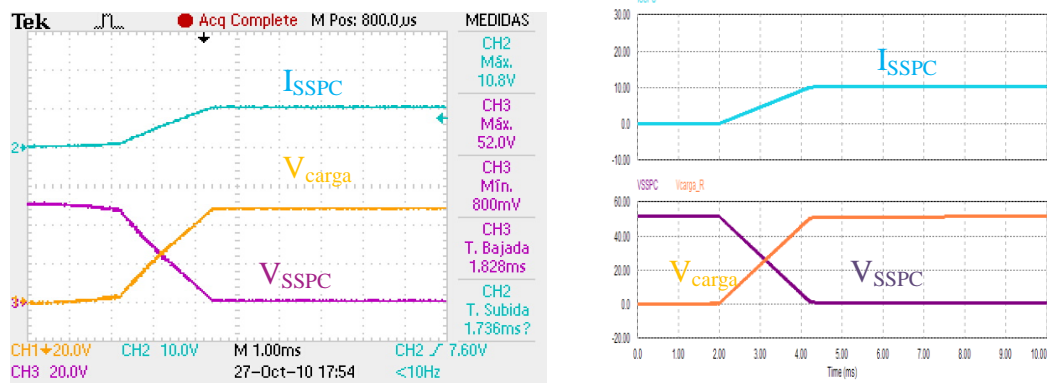
### 6.5.3 Modelado del control activo con derivada constante de la corriente

Para generar el modelo con control activo con derivada constante de la corriente se cambia la señal de referencia procedente del microcontrolador que le llega al comparador, por una rampa que evoluciona hasta el valor máximo permitido de conexión. Este nivel de referencia fija la evolución de la corriente del modelo de SSPC, ver Figura 6.70. El modelo únicamente se configura una vez, independientemente de la carga que se conecte posteriormente.



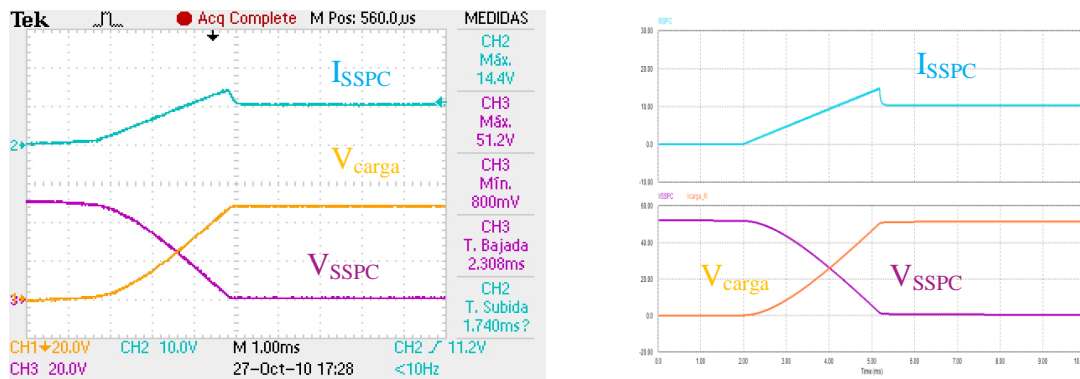
**Figura 6.70: Modelo estructural del prototipo con control activo con derivada constante de la corriente**

Inicialmente se ha validado el modelado con los resultados correspondientes a la conexión de una carga resistiva pura, ver Figura 6.71. En este caso los tiempos de conexión de la simulación reproducen los valores de las medidas experimentales.



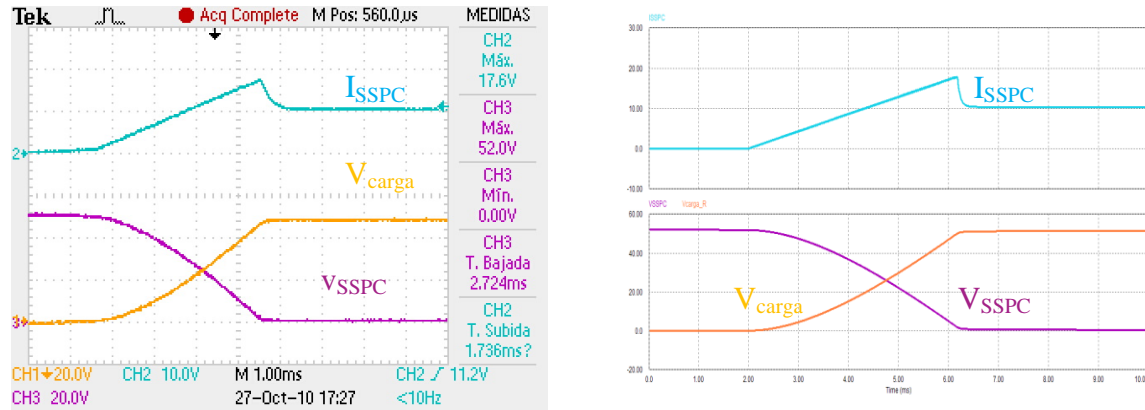
**Figura 6.71: Medidas experimentales y resultados de simulación del modelo de control activo con derivada constante de la corriente, con una carga de 10 Ω**

Durante el transitorio de conexión de una carga de carácter capacitivo, con un condensador de 220 μF, se puede comprobar cómo la respuesta del modelo sigue perfectamente la evolución de las formas de onda en el SSPC, ver Figura 6.72. Por otro lado, los valores de corriente máxima son muy similares en ambos casos.



**Figura 6.72: Medidas experimentales y resultados de simulación del modelo de control activo con derivada constante de la corriente, con una carga de 10 Ω y 220 μF**

Con el mismo modelo y modificando la carga capacitiva de 220 μF a 470 μF, se puede comprobar cómo la respuesta del modelo sigue perfectamente la evolución de las formas de onda en el SSPC, ver Figura 6.73.



**Figura 6.73: Medidas experimentales y resultados de simulación del modelo de control activo con derivada constante de la corriente, en lazo cerrado, con una carga de  $10\ \Omega$  y  $470\ \mu\text{F}$**

Al igual que con los procedimientos anteriores de control durante el transitorio de conexión, y teniendo en cuenta las simulaciones realizadas con control activo con derivada constante de la corriente, se puede concluir que el modelo reproduce la evolución de la corriente y la tensión que soporta el SSPC, para diferentes cargas.

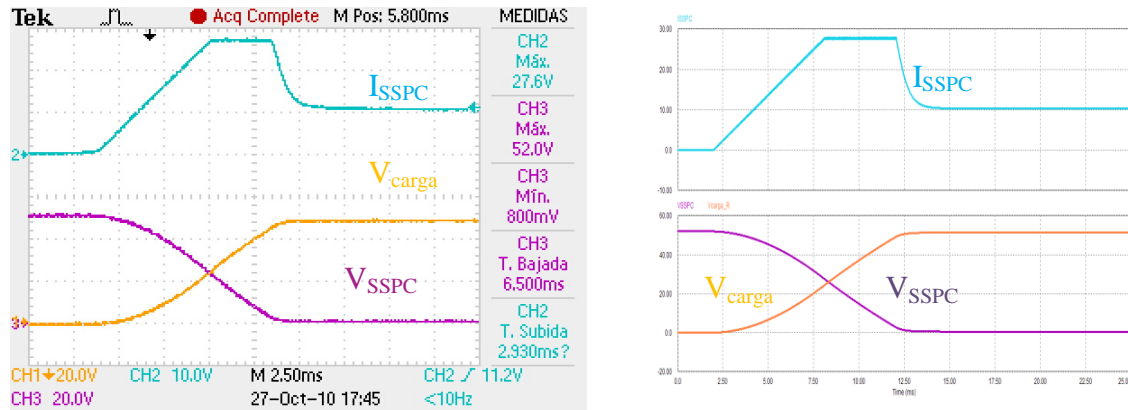
#### 6.5.4 Modelado del control activo generalizado

El control activo generalizado, utiliza un modelo muy similar al de los casos anteriores, y únicamente se modifica la referencia generada con el microcontrolador. En este caso se incluye una referencia que inicialmente es una rampa que evoluciona de manera constante hasta un valor máximo, en este caso 27,6 A, a partir de la cual se mantiene fija. La estructura es similar a la presentada con el control activo por derivada de corriente constante, ver Figura 6.70.

El modelado de la conexión de una carga resistiva coincide con el realizado para la conexión mediante control activo con derivada constante de la corriente. Este caso se ha incluido en el epígrafe anterior.

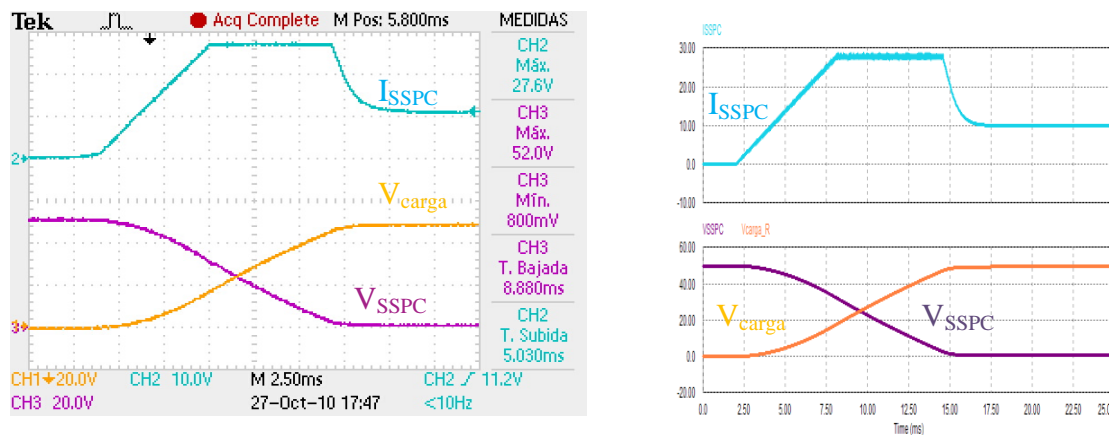
En la Figura 6.74 se muestra la conexión de una carga altamente capacitiva de  $3600\ \mu\text{F}$  y su correspondiente simulación. Como se puede comprobar los tiempos que dura el transitorio de la conexión, la evolución de la corriente y la tensión por el SSPC se ajustan a las medidas experimentales. De este modo, la corriente crece de forma constante hasta

alcanzar el valor máximo, donde se mantiene hasta que se finaliza la carga del condensador. En ese momento alcanza la corriente nominal.



**Figura 6.74:** Medidas experimentales y resultados de simulación del modelo de control activo generalizado con una carga de  $10\ \Omega$  y  $3600\ \mu\text{F}$ , y una corriente máxima de  $27,6\ \text{A}$

Con el mismo modelo y modificando la carga capacitiva de  $3600\ \mu\text{F}$  a  $5400\ \mu\text{F}$ , se puede comprobar cómo la respuesta del modelo sigue perfectamente la evolución de las formas de onda en el SSPC, ver Figura 6.75.



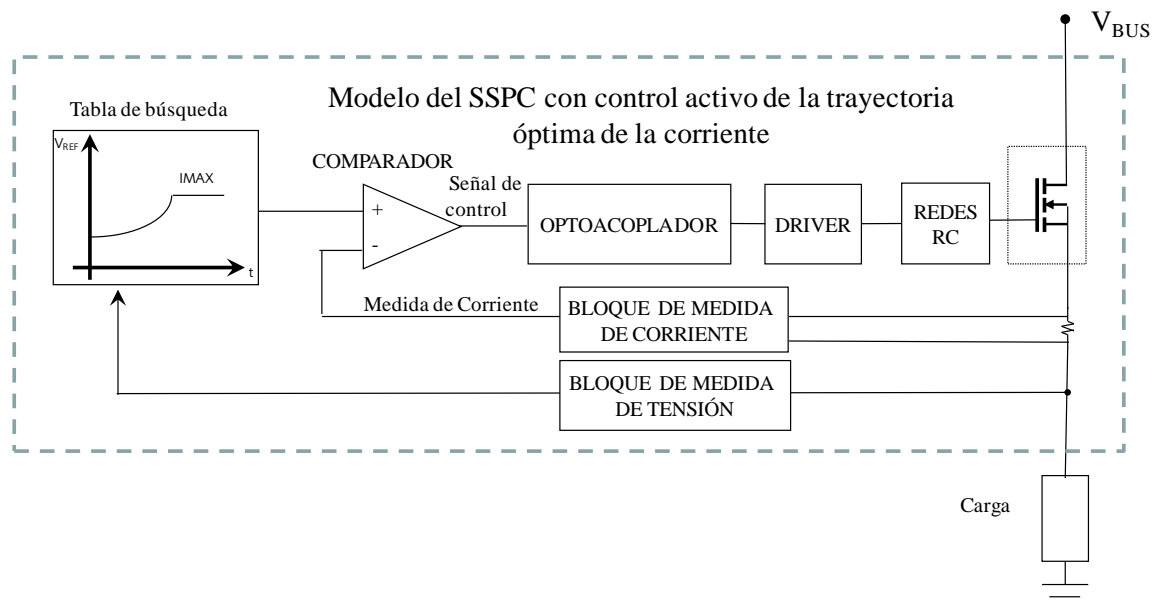
**Figura 6.75:** Medidas experimentales y resultados de simulación del modelo de control activo generalizado con una carga de  $10\ \Omega$  y  $5400\ \mu\text{F}$ , y una corriente máxima de  $27,6\ \text{A}$

Teniendo en cuenta las simulaciones del modelo de SSPC realizadas con control activo generalizado, se puede concluir que el modelo reproduce la evolución de la corriente y la tensión que soporta el SSPC, para diferentes cargas, con esta estrategia.

### 6.5.5 Modelado del control activo por trayectoria óptima de la corriente

Finalmente, se muestran los resultados de simulación del modelo incorporando el control activo por trayectoria óptima de la corriente. Con el objetivo de cubrir todo el rango de la SOA, se ha programado el microcontrolador con una SOA que permite no activar la protección por sobrecorriente de la fuente de alimentación utilizada, en cualquier caso por debajo de las características que puede soportar el MOSFET. Además, para aumentar el límite de corriente máximo que la fuente es capaz de proporcionar, se ha reducido la tensión de bus a 50 V.

Con la estructura del modelo presentado anteriormente, se modifica la señal de referencia procedente del microcontrolador, que le llega al comparador, por un nivel dependiente de la tensión de la carga. Esta tabla coincide con la tabla programada en el prototipo, ver Figura 6.89. A partir de la tensión medida en la carga, la tabla proporciona una referencia que regula la corriente por el SSPC.

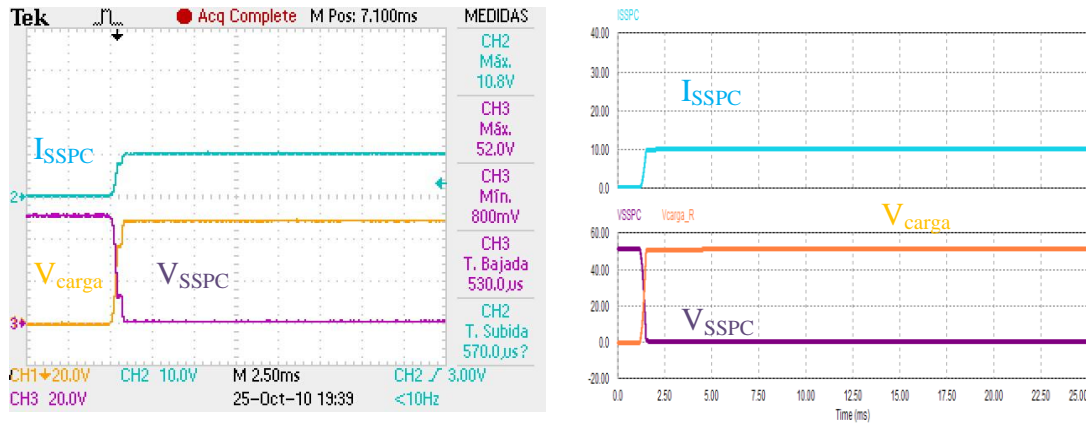


**Figura 6.76: Modelo estructural del prototipo con control activo por trayectoria óptima de la corriente**

Se valida el modelado estructural con los resultados correspondientes a la conexión de una carga resistiva pura, mediante control activo por trayectoria óptima de la corriente,

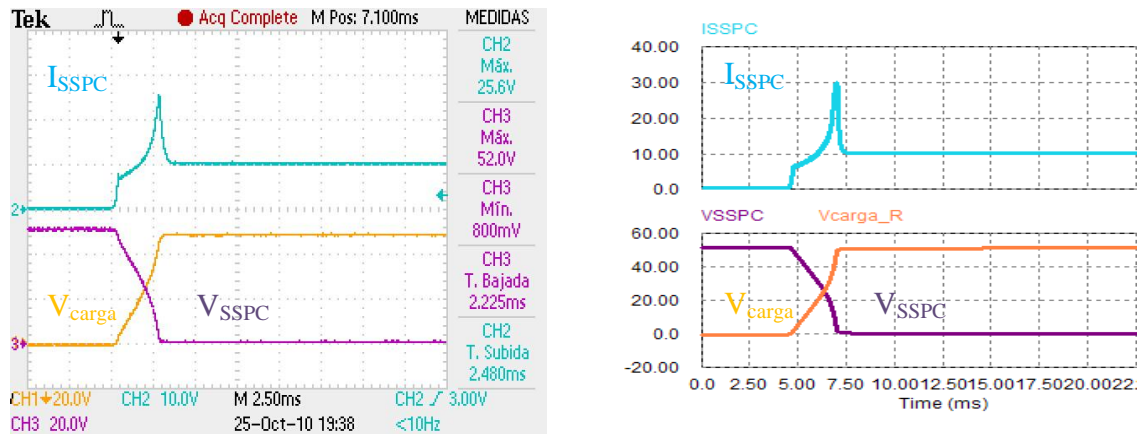


ver Figura 6.77. En este caso los tiempos de conexión de la simulación reproducen los valores de las medidas experimentales.



**Figura 6.77: Resultados experimentales y resultados de simulación con el modelo del control activo por control activo por trayectoria óptima de la corriente, con carga resistiva de 5 Ω a un bus de 50 V**

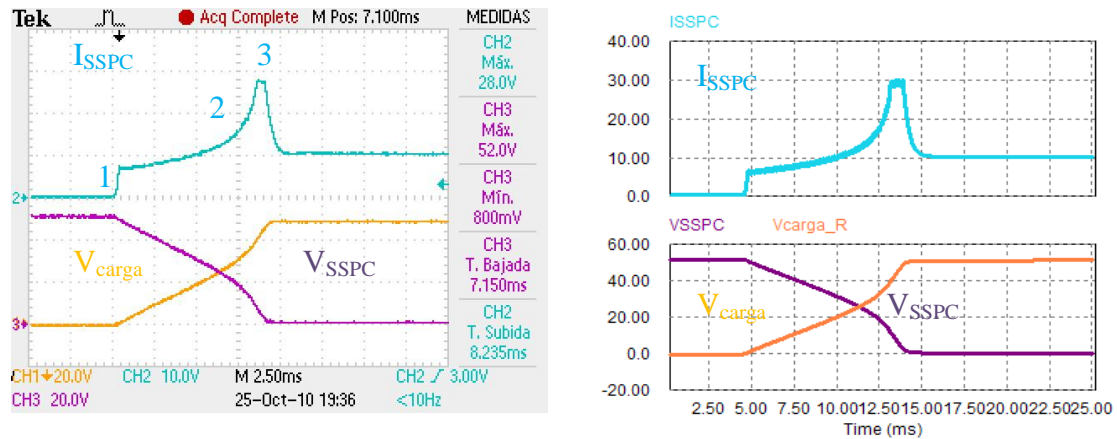
En la Figura 6.78 se observa como el modelo reproduce la forma de onda de la corriente y tensión durante la conexión con control activo por trayectoria óptima de la corriente por el SSPC, para una carga de 5 Ω y 470 μF.



**Figura 6.78: Resultados experimentales y resultados de simulación con el modelo del control activo por trayectoria óptima de la corriente, con una carga de 5 Ω y 470 μF, con una corriente máxima de 28 A, en bus de 50 V**



Cuando se incrementa el valor del condensador de la carga capacitiva, se aprecia que es posible obtener en la simulación del modelo los diferentes tramos de la SOA definidos en el epígrafe 4.6, ver Figura 6.79.



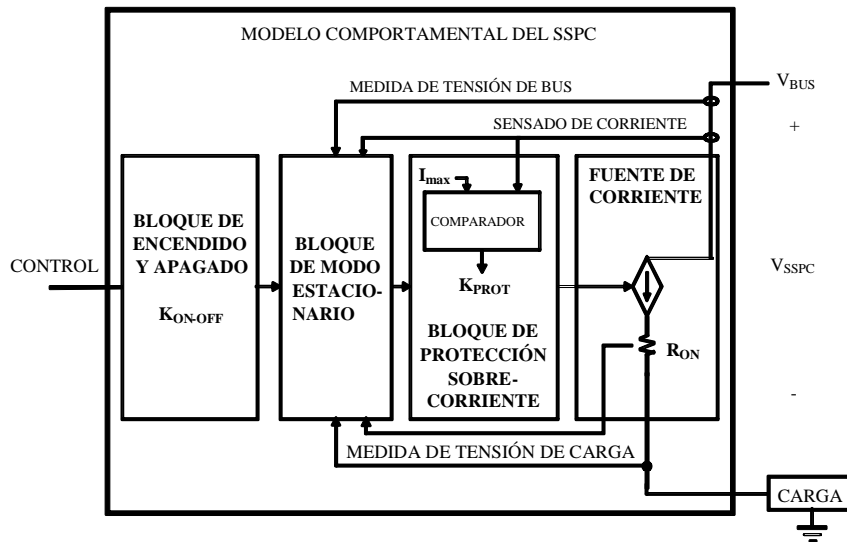
**Figura 6.79: Resultados experimentales y resultados de simulación con el modelo del control activo de la trayectoria óptima de la corriente, con una carga de  $5 \Omega$  y  $1800 \mu F$ , con una corriente máxima de 28 A, en bus de 50 V**

Teniendo en cuenta las simulaciones del modelo de SSPC realizadas con control activo óptimo de la trayectoria de la corriente, se puede concluir que el modelo reproduce la evolución de la corriente y la tensión que soporta el SSPC, para diferentes cargas con el control óptimo de la trayectoria de la corriente, manteniendo el semiconductor dentro de la zona de operación segura.

## 6.6 Modelado comportamental del prototipo

En este apartado se muestran la validación del modelado comportamental propuesto para algunas de las estrategias de conexión con control activo. En este caso se ha validado el modelado del control activo con corriente constante, el control activo con derivada constante de la corriente y el control activo generalizado.

El modelo comportamental no está basado en la estructura del prototipo de SSPC y coincide con el presentado en el capítulo 5. Únicamente, se han ajustado y modificado el bloque encargado de generar la señal del bloque de encendido y apagado, que depende de los tiempos de control programados en el prototipo, y se ha añadido en este bloque un limitador de la corriente para los controles activos con corriente constante y generalizado, ver Figura 6.80.

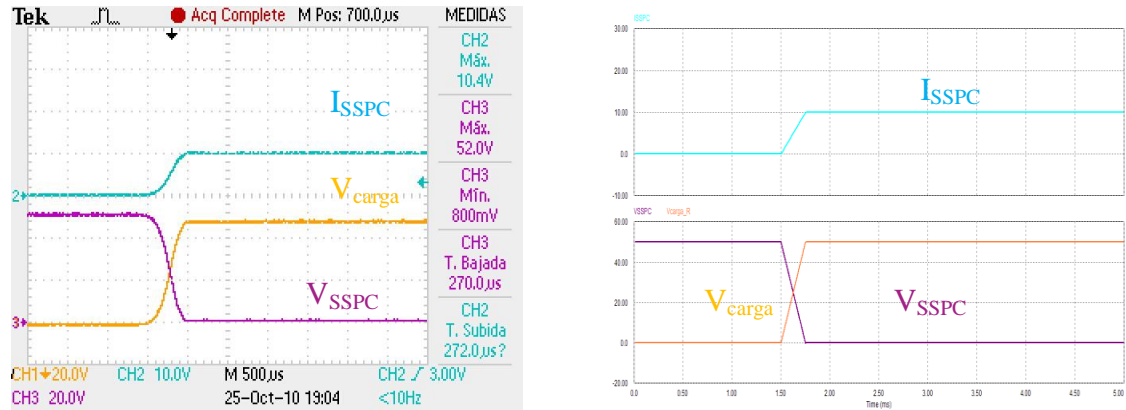


**Figura 6.80: Modelo comportamental del prototipo de SSPC**

Para cada uno de los casos de control activo, el modelo únicamente se configura una vez utilizando las medidas experimentales de la carga resistiva, y se valida con las diferentes cargas capacitivas.

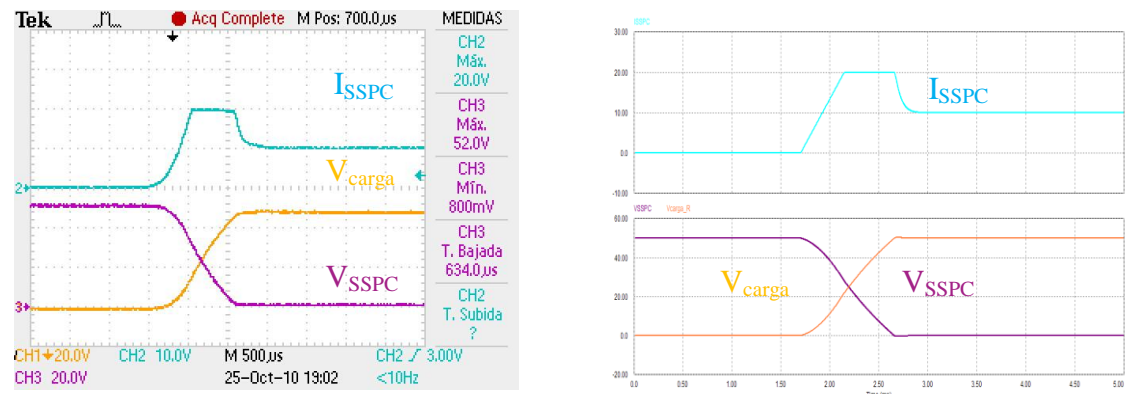
### 6.6.1 Modelado comportamental del control activo con corriente constante

En la Figura 6.81 se muestra la validación del modelo comportamental con resultados obtenidos mediante el control activo con corriente constante con carga resistiva. Como se puede apreciar los tiempos de conexión, niveles de corriente y tensión son muy similares.



**Figura 6.81: Medidas experimentales y resultados de simulación del modelo de control activo con corriente constante con una carga de  $5 \Omega$  y una corriente máxima programada de 20 A**

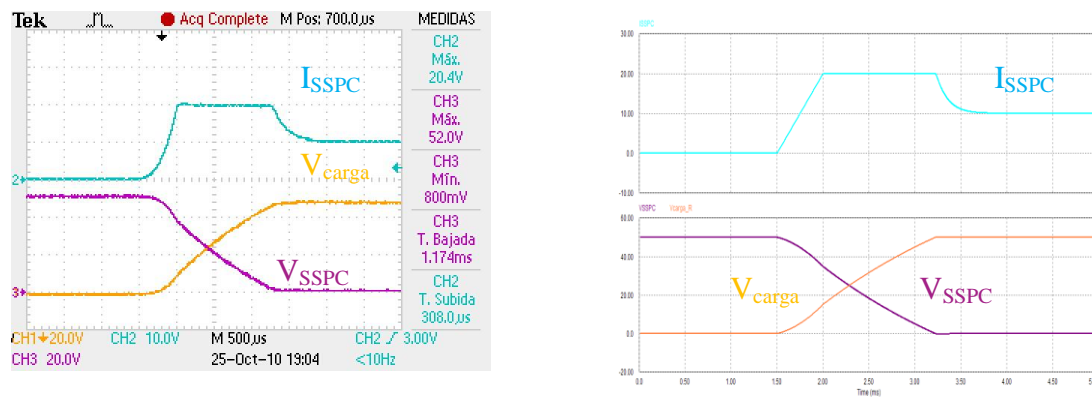
En la Figura 6.82 se muestra el transitorio de conexión real y simulada de una carga con carácter capacitivo, con  $5 \Omega$  y  $220 \mu\text{F}$ , mediante control activo con corriente constante.



**Figura 6.82: Medidas experimentales y resultados de simulación del modelo de control activo con corriente constante con una carga de  $5 \Omega$  y  $220 \mu\text{F}$  y una corriente máxima programada de 20 A**

Se puede observar que en ambos casos la corriente máxima está fijada en 20 A y el tiempo de mantenimiento es muy similar. No obstante, se aprecia cierta pérdida de información en la evolución de la corriente durante los instantes iniciales.

Con una carga altamente capacitiva de 470  $\mu\text{F}$ , se comprueba como aumenta el tiempo de mantenimiento tanto para las medidas experimentales como para la simulación del modelo comportamental de SSPC, ver Figura 6.83. No obstante se observa que hay cierta pérdida de información, en la evolución de la corriente durante los instantes iniciales, debido a que el modelo no tiene en cuenta las redes RC de control de la tensión  $V_{\text{GS}}$  del SSPC.



**Figura 6.83: Medidas experimentales y resultados de simulación del modelo de control activo con corriente constante con una carga de 5  $\Omega$  y 470  $\mu\text{F}$  y una corriente máxima programada de 20 A**

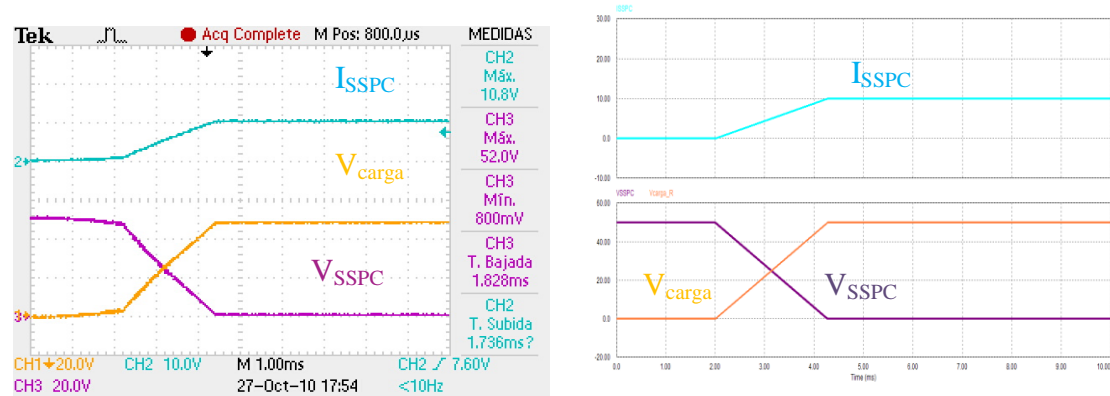
Una vez analizados los resultados experimentales se puede concluir que el modelo comportamental se ajusta al SSPC con control activo con corriente constante en lo referente a tiempos de conexión y valores de corriente, aunque si lo comparamos con los resultados del modelo estructural, presenta peores resultados en la forma de onda de la corriente por el SSPC.

### 6.6.2 Modelado del control activo con derivada constante de la corriente

En el modelo comportamental con control activo por derivada de corriente constante se cambia la señal de referencia procedente del microcontrolador que le llega al comparador

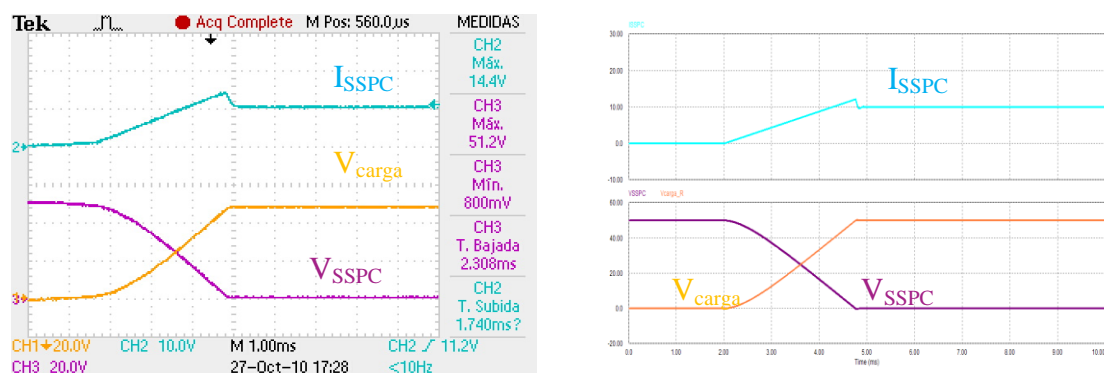
por una rampa que evoluciona hasta el valor máximo permitido de conexión. Esta referencia fija la evolución de la corriente del modelo de SSPC.

Inicialmente se ha validado el modelado comportamental con los resultados correspondientes a la conexión de una carga resistiva pura, ver Figura 6.84. En este caso los tiempos de conexión de la simulación coinciden con los valores experimentales.



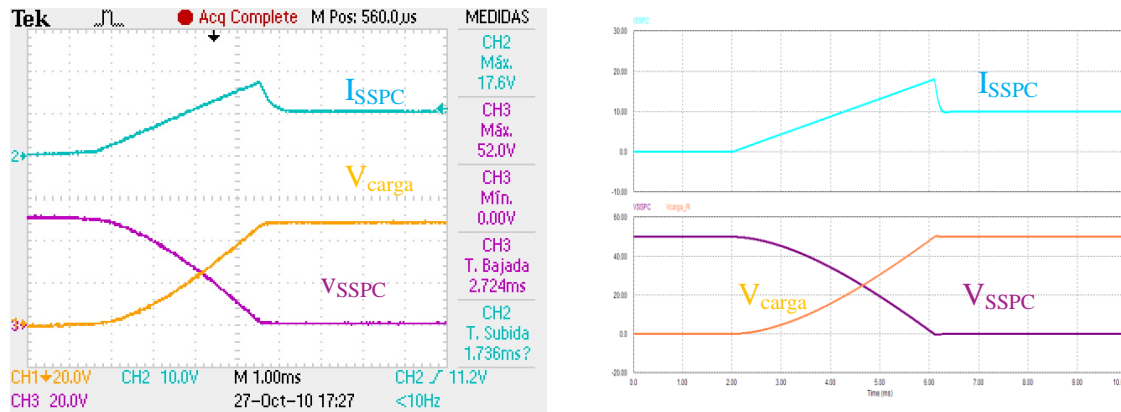
**Figura 6.84: Medidas experimentales y resultados de simulación del modelo de control activo con derivada constante de la corriente con una carga de  $5\ \Omega$**

Durante el transitorio de conexión de una carga con carácter capacitivo,  $5\ \Omega$  y  $220\ \mu\text{F}$ , se puede comprobar cómo la respuesta del modelo comportamental sigue perfectamente la evolución de las formas de onda en el SSPC, ver Figura 6.85. Por otro lado, los valores de tiempo de subida y de corriente máxima son muy similares en ambos casos.



**Figura 6.85: Medidas experimentales y resultados de simulación del modelo de control activo con derivada constante de la corriente con una carga de  $5\ \Omega$  y  $220\ \mu\text{F}$**

Con el mismo modelo y modificando la carga de carácter capacitivo de 220  $\mu\text{F}$  a 470  $\mu\text{F}$ , se puede comprobar cómo la respuesta del modelo, al igual que en el caso anterior, sigue la evolución de las formas de onda en el SSPC, ver Figura 6.86, en cuanto a tiempos de conexión y corrientes máximas.



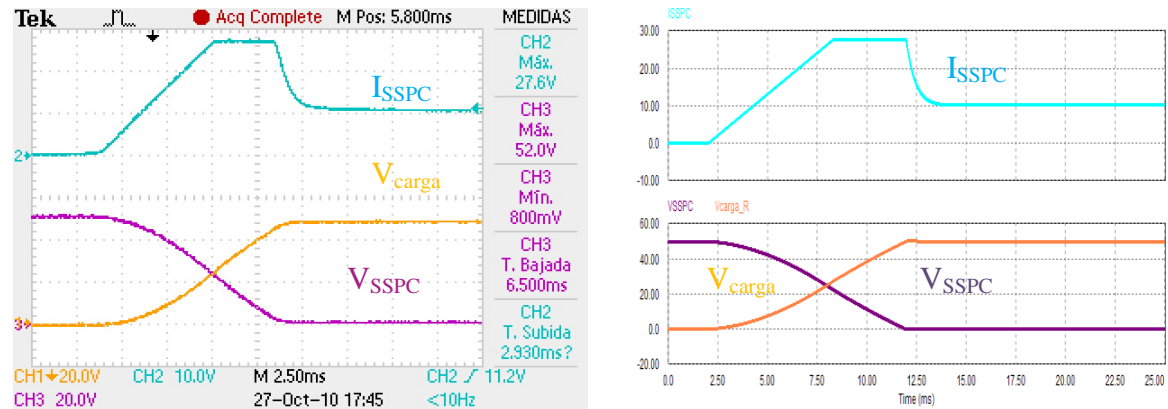
**Figura 6.86: Medidas experimentales y resultados de simulación del modelo de control activo con derivada constante de la corriente con una carga de 5  $\Omega$  y 470  $\mu\text{F}$**

Una vez analizados los resultados experimentales se puede concluir que el modelo comportamental presentado en el capítulo 5, se ajusta a la estrategia de conexión de control activo con derivada constante de la corriente.

### 6.6.3 Modelado del control activo generalizado

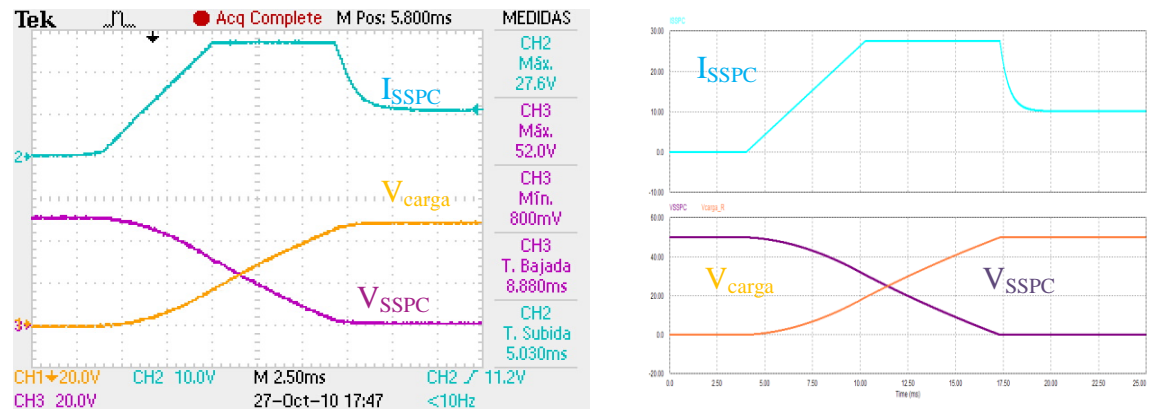
El control activo generalizado, utiliza un modelo muy similar al de los casos anteriores. Así pues, en este modelo se modifica el valor de la rampa que actúa durante los instantes iniciales, y se fija el nivel máximo de corriente que circula por el modelo de SSPC durante el tiempo de mantenimiento.

Una vez ajustado el modelo, se simula con una carga de carácter capacitivo, 5  $\Omega$  y 3600  $\mu\text{F}$ . En la Figura 6.87 se puede comprobar cómo la respuesta del modelo sigue perfectamente la evolución de las formas de onda en el SSPC, en lo referente a tiempo de subida, tiempo de mantenimiento y corriente máxima mantenida.



**Figura 6.87:** Medidas experimentales y resultados de simulación del modelo de control activo generalizado con una carga de 5 Ω y 3600 μF y una corriente máxima de 27,6 A

Con el mismo modelo y modificando la carga capacitiva de 3600 μF a 5400 μF, se puede comprobar cómo la respuesta del modelo se adecua a la evolución de las formas de onda en el SSPC, ver Figura 6.89.

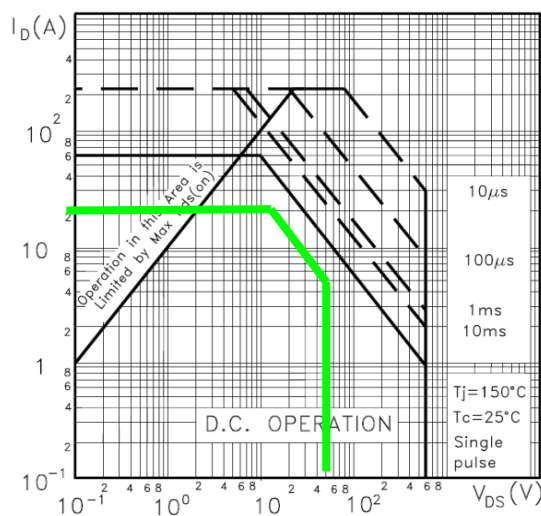


**Figura 6.88:** Medidas experimentales y resultados de simulación del modelo de control activo generalizado con una carga de 5 Ω y 5400 μF y una corriente máxima de 27,6 A

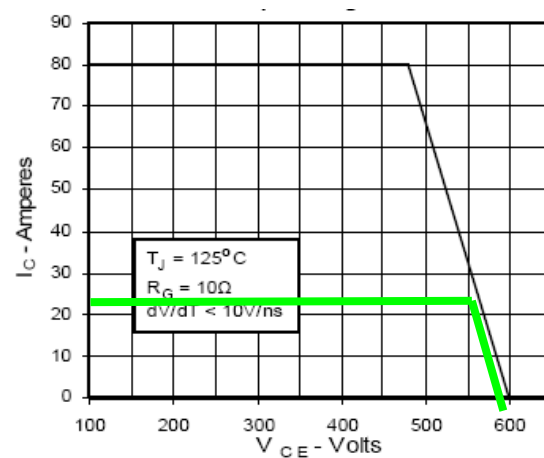
A partir de los resultados experimentales obtenidos se puede concluir que el modelo comportamental se ajusta perfectamente al SSPC con control activo generalizado.

## 6.7 Resultados experimentales del SSPC implementado con diferente tecnología de semiconductor: MOSFET vs IGBT

Otro de las utilidades del prototipo ha sido comparar dos tipos de tecnologías como son la IGBT [50N60B2] y la MOSFET [STY60NM]. Si se tiene en cuenta la zona de operación segura de ambos dispositivos, claramente la conexión óptima del IGBT se puede realizar utilizando el método de conexión por control activo con corriente constante para un bus de 270 V. Esta estrategia permite un mayor nivel de corriente y unos tiempos de conmutación menores, pero presenta disipaciones de potencia muy superiores a los otros procedimientos activos. Como se comentó en el capítulo 4 esta estrategia está limitada para la tecnología MOSFET.



**Figura 6.89: Área de Operación Segura (SOA) del MOSFET, modelo STY60NM50**

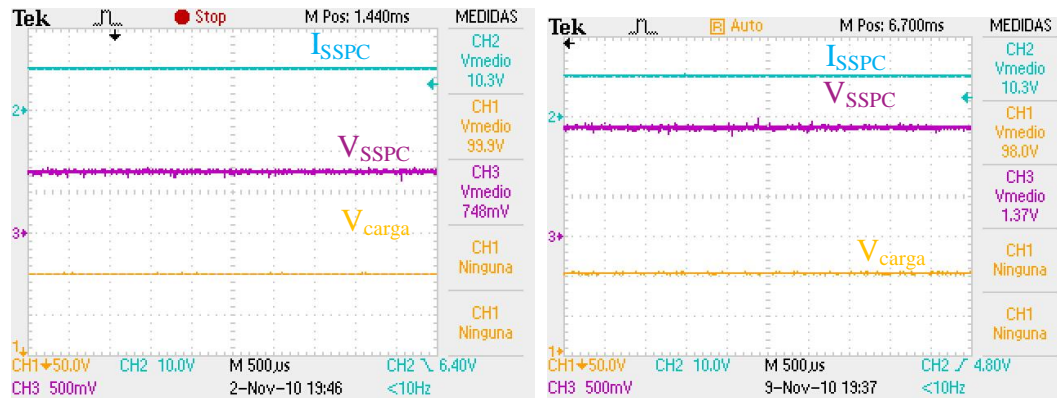


**Figura 6.90: Área de Operación Segura (SOA) del IGBT, modelo 50N60B2**

Con el objetivo de contrastar las dos tecnologías se van a conectar diferentes cargas de carácter altamente capacitivas, manteniendo ambos semiconductores en la zona de operación segura definida para obtener estos resultados experimentales. Estas SOA están delimitadas por el trazo continuo verde en ambas gráficas, ver Figura 6.89 y Figura 6.90.

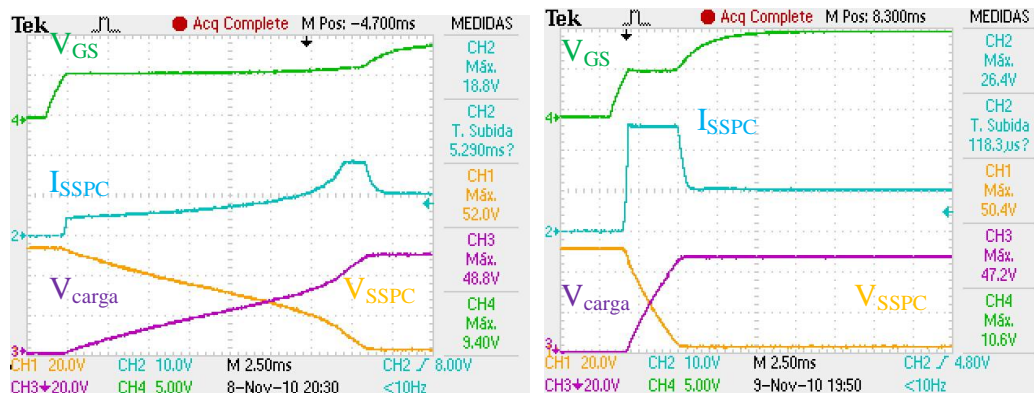


En la Figura 6.91 se muestra la comparación en la caída de tensión en el SSPC, con una corriente nominal de 10 A para el prototipo diseñado cuando está constituido por un IGBT, frente a un SSPC construido a partir de un MOSFET.



**Figura 6.91: Resultados de la caída de tensión en conducción del MOSFET (izquierda) vs IGBT (derecha). Canal 1: Tensión en la carga. Canal 2: Corriente por el SSPC. Canal 3: Tensión en el SSPC. Tensión de bus 100 V**

En la Figura 6.92 y Figura 6.93 se muestra la comparativa de los tiempos de conexión de una carga altamente capacitiva mediante dos SSPC, el primero constituido por un MOSFET (izquierda) y el segundo construido a partir de un IGBT (derecha). Cada uno de los SSPC ha sido programado con un método de control activo por trayectoria óptima de la corriente, de acuerdo con la SOA del MOSFET, Figura 6.89 y del IGBT, Figura 6.90.

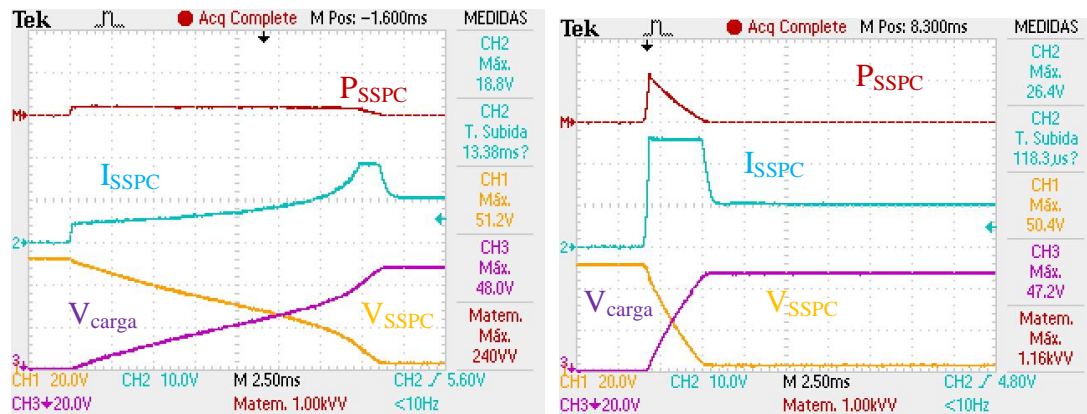


**Figura 6.92: Resultados de la conexión de una carga altamente capacitiva de 5  $\Omega$  y 1800  $\mu$ F con control de la trayectoria óptima de corriente en ambos dispositivos MOSFET (izquierda) vs IGBT (derecha). Canal 1: Tensión en el SSPC. Canal 2:**

**Corriente por el SSPC. Canal 3: Tensión en la carga. Canal 4: Tensión de control  $V_{GS}$ . Tensión de bus 50 V**

Como se puede apreciar el SSPC implementado con IGBT permite conectar cargas capacitivas con niveles de corriente muy superiores al MOSFET, reduciendo los tiempos de conexión notablemente en comparación con el SSPC fabricado con MOSFET.

Por otro lado, con el SSPC diseñado a partir de un MOSFET, Figura 6.92, se reduce el valor máximo de la potencia disipada por el SSPC durante el transitorio de conexión, en comparación con el SSPC diseñado a partir de tecnología IGBT, ver Figura 6.93.



**Figura 6.93: Resultados de la conexión de una carga altamente capacitiva 5  $\Omega$  y 1800  $\mu$ F con control de la trayectoria óptima de corriente en ambos dispositivos MOSFET (izquierda) vs IGBT (derecha). Canal 1: Tensión en el SSPC. Canal 2: Corriente por el SSPC. Canal 3: Tensión en la carga. Canal M: Potencia disipada por el SSPC. Tensión de bus 50 V**

De los resultados experimentales obtenidos durante la comparativa, se puede concluir que los SSPC implementados a partir de la tecnología IGBT, permiten tiempos de conexión menores para altas cargas capacitivas, frente a los SSPC basados en tecnología MOSFET, los cuales reducen las potencias máximas disipadas. Por el contrario, el SSPC diseñado con IGBT tiene mayores caídas de tensión durante el régimen de funcionamiento normal, lo que implica unas pérdidas en funcionamiento continuo muy superiores al SSPC implementado con tecnología MOSFET. Aunque, para los SSPC que soportan corrientes elevadas es más ventajoso utilizar tecnología IGBT debido a que tienen menores caídas de tensión en comparación con la tecnología MOSFET.

## 6.8 Conclusiones

En este capítulo, se ha presentado la estructura del prototipo de SSPC diseñado e implementado como parte de este trabajo de investigación. A partir del prototipo de SSPC se ha validado experimentalmente el funcionamiento de las diferentes estrategias de control, durante los transitorios de conexión de grandes cargas capacitivas, presentadas en el cuarto capítulo. Se puede concluir, que los métodos propuestos se pueden clasificar de acuerdo a su nivel de complejidad, control del tiempo de conexión y capacidad de aprovechamiento del semiconductor del siguiente modo:

- **Control pasivo** es el método más sencillo, con tiempos de conexión no controlados y en el cual se obtiene un peor aprovechamiento del semiconductor.
- **Control activo por corriente constante** tiene complejidad media, tiempos de conexión controlados y presenta un aprovechamiento intermedio del semiconductor
- **Control activo con derivada constante de la corriente** tiene complejidad media, tiempos de conexión controlados y presenta un aprovechamiento intermedio del semiconductor
- **Control activo generalizado** tiene complejidad media, tiempos de conexión controlados y presenta un buen aprovechamiento del semiconductor
- **Control activo de la trayectoria óptima de la corriente** es el método más complejo, con tiempos de conexión controlados y en el cual se obtiene un óptimo aprovechamiento del semiconductor.

También, a partir de los resultados experimentales se han validado las expresiones matemáticas definidas en el capítulo 4. Es importante señalar que para todos los resultados obtenidos y en condiciones de funcionamiento normales, las expresiones se ajustan con errores inferiores al 3%.

Además, se ha validado el funcionamiento de la curva  $I^2t$ , con y sin efecto de la memoria térmica, incluyendo el efecto de la disipación del cable, y de la protección instantánea por sobrecorriente ó cortocircuito.

Por otra parte, y como continuación del capítulo 5 se han validado el modelo estructural y el modelo comportamental, a partir de las medidas experimentales sobre el prototipo construido. De las medidas experimentales y las simulaciones se puede concluir que los modelos se ajustan perfectamente al prototipo de SSPC desarrollado para las distintas estrategias de control.

Finalmente, se ha validado el funcionamiento del prototipo de SSPC con tecnología IGBT. Se puede concluir que para rangos de corrientes bajas, la tecnología MOSFET es mejor que la IGBT. No obstante, los SSPC implementados con IGBT tienen una mayor capacidad a la hora de soportar grandes niveles de corriente durante los transitorios de conexión.

## 6.9 Referencias

- [Avionics05] Avionics Magazine. Access Intelligence. Potomac (United States). Tech Report; “Secure Power with Next-Generation PDSUs”. Volume 29, N.º 6. ISSN-1085-9284. June 2005. Web available: <http://www.avionicsmagazine.com>
- [HP4194A] HP4194A Impedance/Gain-Phase Analyzer Operation Manual, Yokogawa-Hewlett-Packard Co., Ltd., Tokyo, Japan, 1987.
- [Leach] Leach International. Solid State Power Controller 270 VDC, 7.5 A. Engineering Data Sheet. Web available: <http://www.leachintl.com>
- [Maxwell02] Maxwell, J. M.; Blumer, J. H. and Burden, B., “A Configurable Solid State Power Management and Distribution System”. Power Systems Conference. Society of Automotive Engineers, Inc.; October 2002.
- [MS275E] MIL-STD-275E, Printed Wiring for Electronic Equipment. Military Standard. 31th December 1984.
- [MS704] “MIL-STD-704, Aircraft Electrical Power Characteristics”, Military Standard.
- [PSIM] PSIM® Professional Version; Copyright Powersim Inc. Web available: <http://www.powersimtech.com/>
- [RD160] “Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment”. RTCA/DO-160E, RTCA Inc. December 9, 2004.
- [STY60NM] STY60NM50, Power MOSFET; STMicroelectronics, 2003. Technical Data Datasheet. Web available: <http://www.st.com/>
- [50N60B2] 50N60B2 Power IGBT. Technical Data Datasheet.



# Capítulo 7

## **7. CONCLUSIONES, APORTACIONES Y TRABAJOS FUTUROS**





ÍNDICE CAPÍTULO 7

---

7.1	CONCLUSIONES Y APORTACIONES DEL PRESENTE TRABAJO .....	333
7.1.1	<i>Aportaciones relacionadas con las estrategias de conexión de cargas muy capacitivas y con la implementación mediante distintas tecnologías. ....</i>	<i>333</i>
7.1.2	<i>Aportaciones relacionadas con el modelado del SSPC.....</i>	<i>336</i>
7.2	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS .....	339



## 7.1 Conclusiones y aportaciones del presente trabajo

El presente trabajo de tesis se ha centrado en el análisis de estrategias avanzadas de control, el modelado y la implementación de los controladores de potencia de estado sólido (SSPC), así como, en el estudio de su utilización dentro de los nuevos sistemas de distribución de potencia eléctrica (SDPE) embarcados.

Para ello, se ha realizado un detallado y profundo estudio de las arquitecturas convencionales de distribución eléctrica en los aviones actuales. Además, se han presentado las nuevas tendencias en los sistemas de distribución en alta tensión, 270 V<sub>CC</sub> y 230 V<sub>CA</sub> para aplicaciones militares y civiles, respectivamente. También, se han analizado y expuesto las ventajas e inconvenientes de los SSPC dentro de los nuevos sistemas eléctricos embarcados en desarrollo.

Como se ha resumido en el capítulo 3, el SSPC es un elemento clave en las nuevas arquitecturas de distribución, por lo tanto, es necesario hacer frente a la problemática que presentan este tipo de componentes a la hora de trabajar con determinados tipos de cargas, como son las cargas altamente capacitivas. Además, otro problema que presenta el SSPC es la falta de modelos disponibles en las herramientas de simulación actuales.

Partiendo de estas problemáticas, los objetivos de la presente tesis, se pueden agrupar en dos grandes bloques, donde se encuentran las principales aportaciones realizadas dentro de este trabajo de investigación:

- Bloque I: Estrategias de conexión de cargas altamente capacitivas mediante un SSPC. Implementación mediante distintas tecnologías.
- Bloque II: Modelado del controlador de potencia de estado sólido.

Este conjunto de aportaciones se detallan en los siguientes párrafos.

### 7.1.1 Aportaciones relacionadas con las estrategias de conexión de cargas muy capacitivas y con la implementación mediante distintas tecnologías.

La principal aportación de este trabajo, desde el punto de vista de las estrategias de conexión de cargas muy capacitivas, desarrolladas en el capítulo 4, **procede de la**

**propuesta y análisis de cuatro estrategias diferentes avanzadas de control que permiten la conexión de cargas muy capacitivas: Control activo por corriente constante, control activo por derivada de corriente constante, control activo generalizado y control activo por trayectoria óptima de la corriente.**

Estos métodos de control activo se pueden clasificar de acuerdo a su nivel de complejidad, control del tiempo de conexión y capacidad de aprovechamiento del semiconductor del siguiente modo:

- **Control activo por corriente constante** tiene complejidad media, tiempos de conexión controlados y presenta un aprovechamiento intermedio del semiconductor.
- **Control activo por derivada de la corriente constante** tiene complejidad media, tiempos de conexión controlados y presenta un aprovechamiento intermedio del semiconductor.
- **Control activo generalizado** tiene complejidad media, tiempos de conexión controlados y presenta un buen aprovechamiento del semiconductor.
- **Control activo de la trayectoria óptima de la corriente** es el método más complejo, con tiempos de conexión controlados y en el cual se obtiene un óptimo aprovechamiento del semiconductor.

Las principales ventajas que aportan las estrategias planteadas en el trabajo de investigación, aplicadas a la conexión de cargas muy capacitivas, son:

- Se optimizan los tiempos de conexión.
- Se limita la potencia máxima disipada por el semiconductor, durante los transitorios de conexión.
- Se disminuyen las perturbaciones introducidas durante los transitorios de conexión.
- Se controlan las sobrecorrientes en los SSPC durante los transitorios de conexión.

- Se aumenta la fiabilidad del dispositivo.
- Todas estas ventajas se consiguen mediante un diseño que permite disminuir la potencia de cálculo requerida en el microcontrolador.

Tras un análisis detallado de las estrategias y métodos de conexión se ha presentado un conjunto de ecuaciones que permiten calcular, para cada una de las estrategias presentadas, el valor de la capacidad máxima del condensador que es posible cargar en función de la corriente máxima, corriente nominal, la tensión de bus soportada por el SSPC y los tiempos del transitorio de conexión, de forma sencilla.

Destacar una de las estrategias de control avanzado, donde se ha presentado de forma original **un método de conexión mediante el control activo por trayectoria óptima de la corriente**. Este novedoso procedimiento de conexión de cargas muy capacitivas, permite optimizar la trayectoria de la corriente en función de las limitaciones del semiconductor, definidas por el fabricante dentro del área de operación segura (SOA).

La principal ventaja de esta estrategia de conexión es que permite reducir el número de elementos semiconductores necesarios para la conmutación de una carga muy capacitiva, ya que mediante esta estrategia el SSPC ajusta los tiempos de conexión en función de la tensión en la carga, independientemente de su valor. Además, mejora los tiempos de conexión de la carga, en comparación con las otras estrategias activas propuestas en el capítulo cuarto, ya que aprovecha al máximo las regiones de funcionamiento del semiconductor, y se ajusta a la SOA del semiconductor principal.

Por último, el prototipo final diseñado se ha utilizado para **comparar dos tecnologías con las que se puede implementar el SSPC: MOSFET o IGBT**. De la comparación de los dos semiconductores, se puede concluir que mediante el uso de SSPC construidos mediante IGBT se pueden conectar cargas capacitivas en tiempos de conexión menores, en comparación con la tecnología MOSFET, ajustándonos a la zona de funcionamiento segura en ambos casos. También se puede señalar que, en la comparativa realizada para los niveles de corriente nominal de funcionamiento, la tecnología MOSFET presenta menores pérdidas en conducción que el IGBT.

Además, mediante el prototipo final de SSPC, se ha podido evaluar todas las estrategias de conexión propuestas en el capítulo cuarto y el modelado propuesto en el quinto capítulo.

### 7.1.2 Aportaciones relacionadas con el modelado del SSPC

Teniendo en cuenta las necesidades planteadas durante las fases de diseño de un controlador de potencia de estado sólido y del análisis de un SDPE basado en SSPC, se han propuesto dos tipos de modelos:

- Un modelo estructural para afrontar la etapa de diseño del componente, en el se han incluido los diferentes bloques que componen un SSPC: bloque de control del driver, del elemento semiconductor, interface, bloque de protección curva  $I^2t$ , bloque de control activo.
- Un modelo comportamental que es independiente de la estructura interna del SSPC y que reproduce la respuesta del dispositivo, reduciendo el número de señales internas simuladas.

De este modo, las dos principales aportaciones de este trabajo, desde el punto de vista del modelado, **es la propuesta, de forma original, del modelo estructural de un SSPC en la herramienta de simulación PSIM, el cual permite detectar problemas durante la fase de diseño del componente; y de un modelo comportamental para su aplicación a la simulación de grandes SDPE durante las fases de integración del componente en un sistema.** Además, en el modelo estructural se ha desarrollado el modelo de un MOSFET que reproduce las diferentes zonas de funcionamiento (corte, activa y saturación) en la herramienta de simulación PSIM, a partir de su componente homólogo en el programa de simulación Pspice, el cual ha sido integrado en el modelo estructural del SSPC.

La principal ventaja que aporta el modelo estructural del SSPC es que:

- Permite reproducir el comportamiento del SSPC durante la fase de diseño, de forma que es posible validar las diferentes estrategias de conexión y realizar las mejoras necesarias antes del montaje final del prototipo.

Las principales características y ventajas que aporta el modelo comportamental del SSPC son:

- El modelo comportamental puede ser ajustado en base a los datos recogidos en la información facilitada por el fabricante y las mediciones experimentales, sin necesidad de conocer la estructura interna del componente.
- El modelo comportamental permite la reducción de los tiempos de simulación, que pueden llegar a ser de un 95,5% en comparación con los tiempos requeridos por un modelo estructural de un SSPC. Este es un dato importante teniendo en cuenta el elevado número de SSPC en los nuevos SDPE.

También, se ha propuesto **un novedoso modelo de la curva  $I^2t$  con memoria térmica, que evoluciona de acuerdo con las características del cable al cual protege y que, además, tiene en cuenta el efecto de la disipación térmica en dicho cable.** Para ello ha sido necesaria la implementación de un algoritmo  $I^2t$  que tiene en cuenta la disipación térmica del cable, lo cual permite mejorar la precisión a la hora de activar las protecciones.

Hay que destacar que el modelado estructural y comportamental desarrollado en esta tesis doctoral incluye:

- Protección  $I^2t$  clásica y protección instantánea frente a sobrecorriente y cortocircuito.
- Parametrización de la respuesta dinámica del modelo del SSPC (tiempo de subida, tiempo de bajada).
- Memoria Térmica, compensación con la temperatura ambiental y efecto de la disipación térmica del cable.

Finalmente, el modelado comportamental se ha comprobado experimentalmente con dos SSPC comerciales, de los fabricantes DDC y Sensitron, en el capítulo quinto; y con el prototipo de SSPC desarrollado, en el capítulo 6. El modelado estructural se ha validado con el prototipo diseñado en el capítulo 6.



## 7.2 Recomendaciones para trabajos futuros

Durante el desarrollo de la tesis doctoral se han identificado una serie de líneas de investigación, así como posibles estudios y trabajos futuros para mejorar, profundizar y ampliar los campos de aplicación relacionados con los SSPC.

De este modo, las líneas de trabajos futuros se pueden centrar en los siguientes puntos:

1. Utilización de una **FPGA frente al uso de microcontroladores** para ejecutar el sistema de control del SSPC, con el objetivo de conseguir una mayor potencia de cálculo y mejorar los tiempos de respuesta del control activo y su implementación.
2. Teniendo en cuenta las ventajas que ofrecen los semiconductores desarrollados a partir de la **tecnología de carburo de silicio (SiC)**, la cual permite aumentar los niveles de corriente con menores pérdidas, se propone validar el prototipo con semiconductores disponibles fabricados a partir de carburo de silicio, como pueden ser los semiconductores del tipo JFET o MOSFET.
3. Implementar la **funcionalidad de detección del fallo por arco** en el SSPC, así como la funcionalidad de fallo seguro que permita al SSPC permanecer en circuito abierto cuando se produce un fallo en el semiconductor principal.
4. Analizar y optimizar el diseño del prototipo mediante la reducción del número de tierras flotantes. Además, mejorar la **implementación del SSPC** con componentes de **montaje superficial y profundizar en la hibridación** del dispositivo.



# Capítulo 8

## **8. DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA TESIS DOCTORAL**



ÍNDICE CAPÍTULO 8

---

8.1	INTRODUCCIÓN .....	345
8.2	ÁREAS DE APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	346
8.2.1	<i>Proyectos Tecnológicos</i> .....	346
8.2.1.1	Subprograma Nacional de Transporte Aéreo (MEDEA).....	346
8.2.1.2	Sistema de distribución de cargas de HVDC de EADS-CASA.....	346
8.2.1.3	Diseño y modelado de sistemas electrónicos aeroespaciales (DIMOS) .....	347
8.2.1.4	Sistemas de Alimentación para Aplicaciones Embarcadas y Portátiles basadas en Fuentes y Dispositivos de Almacenamiento de Energía Emergentes (SAUCE).....	347
8.2.2	<i>Patentes</i> .....	347
8.2.3	<i>Publicaciones</i> .....	348
8.2.3.1	Publicaciones en Revistas Internacionales .....	348
8.2.3.2	Publicaciones en Congresos Internacionales .....	348
8.2.3.3	Publicaciones en Congresos Nacionales.....	349
8.2.3.4	Publicaciones en revisión .....	349
8.2.4	<i>Proyecto final de carrera</i> .....	350
8.3	OTRAS DIFUSIONES, PUBLICACIONES Y PATENTES DE INTERÉS .....	351
8.3.1	<i>Patentes</i> .....	351
8.3.2	<i>Otros artículos de interés en congreso</i> .....	351
8.3.3	<i>Proyecto fin de máster</i> .....	352



## **8.1 Introducción**

Durante la realización de la tesis doctoral ha sido posible la difusión y utilización de los resultados obtenidos, tanto parciales como definitivos, en distintas actividades de carácter científico y tecnológico.

En este capítulo se incluyen los proyectos de investigación, patentes, publicaciones y proyectos finales de carrera asociados a esta tesis doctoral.

Además, se presentan otras actividades de difusión ligadas indirectamente a este trabajo de investigación, y que tienen relación con la temática de la tesis doctoral.

## 8.2 Áreas de aplicación de los resultados obtenidos

En los siguientes párrafos se incluyen los proyectos de investigación, patentes, publicaciones y proyectos finales de carrera asociados directamente a esta tesis doctoral.

### 8.2.1 Proyectos Tecnológicos

Los trabajos desarrollados en esta tesis han sido aplicados a varios proyectos de carácter científico y tecnológico. Estos proyectos han sido subvencionados por el Ministerio de Educación y Ciencia, Ministerio de Ciencia e Innovación, la Comunidad de Madrid y el CDTI. Asimismo, algunos de ellos están participados por entidades privadas, en especial EADS-CASA.

#### 8.2.1.1 Subprograma Nacional de Transporte Aéreo (MEDEA)

Este proyecto estuvo centrado en el modelado y estudio de la estabilidad de los sistemas de distribución eléctrica a 270 V de corriente continua con controladores de potencia de estado sólido en aplicaciones aeronáuticas (MEDEA). El proyecto MEDEA, Ref.: CIT-370200-2005-4, fue financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, dentro del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica, durante el año 2005, en la parte dedicada al Fomento de la Investigación Técnica (PROFIT), y fue cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

#### 8.2.1.2 Sistema de distribución de cargas de HVDC de EADS-CASA

Relacionado con la temática de la tesis doctoral, la empresa EADS-CASA está realizando un banco de distribución de potencia eléctrica, dentro del marco de varios proyectos tecnológicos. En estos proyectos la arquitectura propuesta, para el sistema de distribución de potencia eléctrica, está basada en el uso de SSPC y en un sistema de distribución en alta tensión a 270 V<sub>CC</sub>.

Debido a la envergadura global del proyecto se ha dividido hasta la fecha en tres fases:



- **Fase I:** etapa realizada durante los años 2005-2006. Financiado por el Plan del Sector Aeroespacial de la Comunidad de Madrid. El proyecto “Sistema de distribución de cargas HVDC” tiene la Ref.: 04-AEC0527-000050/2005.
- **Fase II:** etapa que abarca los años 2007-2009. Parcialmente subvencionados por la Comunidad de Madrid y por fondos internos de la compañía.
- **Fase III:** etapa que abarca los años 2010-2012. Proyecto Interempresas subvencionado por el CDTI y por fondos internos de la compañía EADS y el resto de participantes del proyecto como son Indra, Greenpower, Ingeniería Viesca y Besel.

#### *8.2.1.3 Diseño y modelado de sistemas electrónicos aeroespaciales (DIMOS)*

Este proyecto está centrado en el modelado y análisis de los sistemas electrónicos aeroespaciales al nivel de subsistema. Este proyecto fue financiado por Ministerio de Educación y Ciencia, mediante el proyecto DIMOS, Ref.: DPI2006-14866-C02-02. La fecha de inicio del proyecto: 1 de Octubre de 2006. La fecha de finalización del proyecto: 31 de Septiembre de 2009.

#### *8.2.1.4 Sistemas de Alimentación para Aplicaciones Embarcadas y Portátiles basadas en Fuentes y Dispositivos de Almacenamiento de Energía Emergentes (SAUCE)*

Una de las líneas de investigación de este proyecto es el estudio de los SSPC en los sistemas eléctricos embarcados. El proyecto está financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, mediante el proyecto SAUCE, Ref.: DPI2009-12501. La fecha de inicio del proyecto: 1 de Enero de 2010. La fecha de finalización del proyecto: 31 de Diciembre de 2012.

### **8.2.2 Patentes**

En este apartado se incluye la patente que ha sido presentada por el autor y que guarda relación directa con el tema de la tesis doctoral:

- “*Procedimientos de control activo para la conexión de cargas altamente capacitivas mediante SSPCs*”. Solicitud de Patente Nacional con el N°

P201031921. Esta patente recoge una de las aportaciones principales de este trabajo de investigación, recogida en el capítulo cuarto. Autor: **D. Izquierdo** et al.

- Se ha firmado un acuerdo con la empresa EADS para la extensión de esta patente a otros países europeos (PCT).

### 8.2.3 Publicaciones

En este apartado se incluyen las publicaciones que han sido consecuencia del trabajo desarrollado dentro de la presente tesis doctoral. De las publicaciones se pueden destacar: una publicación aceptada en revista incluida en el *Journal Citation Report* (JCR), cuatro publicaciones en congresos internacionales incluidos en el “*ISI web of knowledge*” y varias en congresos nacionales.

#### 8.2.3.1 Publicaciones en Revistas Internacionales

- **D. Izquierdo**, A. Barrado, C. Raga, M. Sanz, A. Lázaro. “*Protection devices for aircraft electrical power distribution systems: State of the Art*”. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. April 2011

#### 8.2.3.2 Publicaciones en Congresos Internacionales

- **D. Izquierdo**, A. Barrado, M. Sanz, C. Fernández, P. Zumel “*Modeling Methods for Solid State Power Controllers (SSPC)*”; *Compatibility and Power Electronics. 6th International Conference-Workshop, CPE'09, May 20-22, 2009*.
- A. Barrado, **D. Izquierdo**, M. Sanz, C. Raga, A. Lázaro. “*Behavioural Modeling of Solid State Power Controllers (SSPC) for Distributed Power Systems*”. *Applied Power Electronics Conference and Exposition 2008. APEC '09. 24th Annual, 16-19 February 2009*.
- **D. Izquierdo**, A. Barrado, C. Raga, M. Sanz, P. Zumel, A. Lázaro. “*Protection devices for aircraft electrical power distribution systems: a Survey*” *Industrial Electronics Society, 2008. IECON 2008. 35th Annual Conference of IEEE. Orlando November 11-13, 2008*.

- A. Barrado, **D. Izquierdo**, C. Raga, A. Lázaro, C. M. Sanz “*SSPC Model with Variable Reset Time, Environmental Temperature Compensation and Thermal Memory Effect*”. *Applied Power Electronics Conference and Exposition 2008. APEC '08. Conference Proceedings 2008*.

#### 8.2.3.3 Publicaciones en Congresos Nacionales

- D. López del Moral, A. Barrado, **D. Izquierdo**, M. Sanz y J. Vázquez. “Estado de la técnica sobre arcos eléctricos en el entorno aeronáutico”. Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación. SAAEI 2010.
- **D. Izquierdo**, A. Barrado, M. Sanz, V. Valdivia. “Métodos de Modelado para Controladores de Estado Sólido de Potencia (SSPC)”. Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación. SAAEI 2009.
- **D. Izquierdo**, A. Barrado, C. Raga, M. Sanz, P. Zumel, A. Lázaro. “Estado de la Técnica de los Elementos de Protección en los Sistemas de Distribución Eléctrica en Aeronaves”. Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación. SAAEI 2008.
- C. Raga, A. Barrado, **D. Izquierdo**, A. Lázaro, I. Quesada. “Modelado estructural de un actuador genérico utilizado en sistemas de distribución de aeronaves”. Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación. SAAEI 2007.

#### 8.2.3.4 Publicaciones en revisión

- **D. Izquierdo**, A. Barrado, M. Sanz, C. Fernández, P. Zumel. “*Behavioral model for Solid State Power Controllers (SSPC)*”. *IEEE Aerospace and Electronic Systems*.
- **D. Izquierdo**, A. Barrado, M. Sanz, C. Fernández, R. Morgado. “Estrategias de control avanzadas de SSPC para la conexión de cargas altamente capacitivas”. Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación. SAAEI 2011.

- **D. Izquierdo**, A. Barrado, M. Sanz, C. Fernández, R. Morgado. “Estrategia de control de SSPC por trayectoria óptima de la corriente para su aplicación en sistemas embarcados”. Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación. SAAEI 2011.
- **D. Izquierdo**, A. Barrado, M. Sanz, C. Fernández, P. Zumel. “Advanced control strategies for SSPC applied to connect highly capacitive loads”. IEEE Transactions on Power Electronics.
- **D. Izquierdo**, A. Barrado, M. Sanz, C. Fernández, A. Lázaro. “SSPC control strategy by optimal trajectory of the current for application to onboard systems”. IEEE Transactions on Industrial Electronics.

#### 8.2.4 Proyecto final de carrera

Durante la realización de esta tesis, como profesor en el Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad Carlos III de Madrid, he actuado como director de los siguientes proyectos fin de carrera, relacionados con el tema de la tesis:

- Estudios de los electos físicos y sistemas de protección en los sistemas de distribución de potencia eléctrica embarcados (Julio 2009). Autor: David Lopez del Moral.
- Diseño e implementación de un Controlador de Potencia de Estado Sólido (Febrero 2010). Autor: Roberto Hernandez Morgado.

### 8.3 Otras actividades, publicaciones y patentes de interés

Durante el periodo de realización la tesis doctoral, se ha participado en trabajos de investigación en relación con los nuevos sistemas de distribución de potencia, indirectamente ligados con el trabajo de investigación de esta tesis doctoral, de los cuales se han obtenido las siguientes patentes y publicaciones.

#### 8.3.1 Patentes

- “*Electrical power control system for a vehicle*”. Solicitud de Patente Europea con el N° 10382268.0. Basada en un sistema eléctrico totalmente constituido por SSPC y sin elementos magnetotérmicos. Dentro del marco del proyecto HVDC realizado en la empresa EADS. Autor: **D. Izquierdo** et al.

#### 8.3.2 Otros artículos de interés en congreso

- **D. Izquierdo**, R. Azcona, F. J López del Cerro, C. Fernández “*Electrical Power Distribution Architecture (HV270DC), for All Electric Aircraft*”; Proc. 27th International Congress of the Aeronautical Sciences ICAS’10 Sep 2010.
- **D. Izquierdo**, R. Azcona, F. J López del Cerro, B. Delicado, C. Fernández. “*Electrical Power Distribution System (HV270DC), for Application in More Electric Aircraft*”. Applied Power Electronics Conference and Exposition 2010. APEC '10. 25th Annual, 16-19 February 2010.
- **D. Izquierdo**, R. Azcona, F. J López del Cerro, B. Delicado, C. Fernández. “Sistema de Distribución de Potencia Eléctrica (SDPE) a 270 VCC, para su Aplicación en Aviones Más Eléctricos (HV270DC)”. Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación. SAAEI 2009.
- J. M. Sánchez, G. Sospedra, A. García, S. Barceló, B. Montesinos, A. Camina, M. Sierra, **D. Izquierdo**, R. Azcona, F. López del Cerro, V. Valdivia, A. Barrado, A. Lázaro;”Unidad de potencia auxiliar basada en pila de combustible y baterías

avanzadas para un sistema eléctrico de avión de 270VDC”; IV Congreso Nacional de Pilas de Combustible CONAPPICE 2010.

- J. A. Oliver, P. Zumel, M. Sanz, C. Raga, **D. Izquierdo**, O. Garcia, A. Barrado, R. Prieto, R. Azcona, B. Delicado and J. A. Cobos; *“High level decision methodology for the selection of a fuel cell based power distribution architecture for an aircraft application”*, ECCE 2009.

### 8.3.3 Proyecto fin de máster

Durante la realización de la tesis como ingeniero de sistemas del Departamento de Eléctrica de EADS, ha dirigido un proyecto fin de máster, relacionado con el tema de tesis:

- *“Integration of SSPC modules into conventional and new platforms”* (Julio 2010). Autor: Roberto Hernandez Morgado.

# **Anexo A**

Cálculos de los parámetros de  
funcionamiento de las estrategias de  
conexión de cargas altamente  
capacitivas





## A.1 CONTROL PASIVO

### DATOS

$$V_{BUS} := 270$$

$$I_{max} := 75$$

$$R := 27$$

$$P_{SOA} := 2000$$

$$I_{nom} := \frac{V_{BUS}}{R}$$

$$I_{nom} = 10$$

$$k_m := 40$$

$$V_{driver} := 9$$

$$V_t := 1$$

$$R_g := 10000$$

$$C_g := 3 \cdot 10^{-6}$$

$$t_o := -R_g \cdot C_g \cdot \ln \left( 1 - \frac{V_t}{V_{driver}} \right)$$

$$t_s := -R_g \cdot C_g \cdot \ln \left[ \left| 1 - \frac{1}{V_{driver}} \cdot \left( \frac{I_{max}}{k_m} + V_t \right) \right| \right] - t_o$$

$$t := 1 \cdot 10^{-4}, 1.15 \cdot 10^{-4} \dots t_s \cdot 1.5$$

$$t_s = 8.012 \times 10^{-3}$$

### CALCULO DEL CONDENSADOR

$$C_{maximo\_rampa}(V_{BUS}, t_s, I_{max}, I_{nom}) := \frac{1}{V_{BUS}} \cdot \left[ (t_s) \cdot \left( \frac{I_{max}}{2} - \frac{I_{nom}}{3} \right) \right]$$

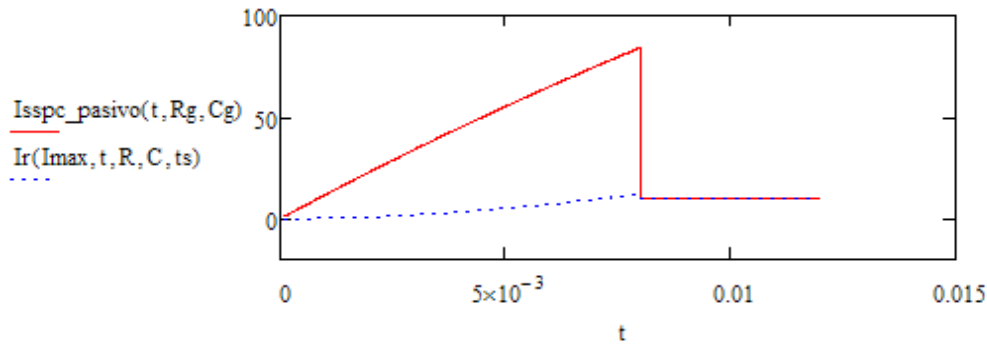
$$C := C_{maximo\_rampa}(V_{BUS}, t_s, I_{max}, I_{nom})$$

### CALCULO DE LA CORRIENTE POR EL SSPC Y LA CARGA

$$V_c(I_{max}, t, R, C, t_s) := \frac{V_{driver} \cdot k_m \cdot R}{R_g \cdot C_g - R \cdot C} \cdot \left[ R_g \cdot C_g \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{R_g \cdot C_g}} \right) + R \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1 \right) \right]$$

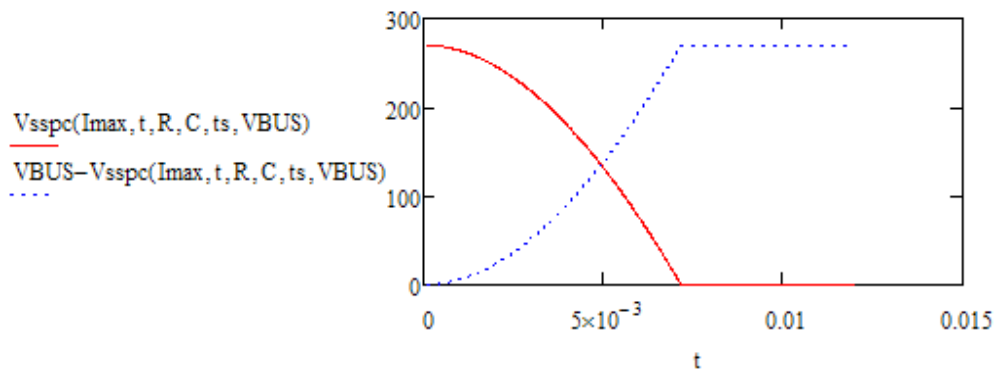
$$I_{sspc\_pasivo}(t, R_g, C_g) := \text{if} \left[ t < t_s, \frac{V_c(I_{max}, t, R, C, t_s)}{R} + \frac{V_{driver\_km}}{R_g \cdot C_g - R \cdot C} \cdot R \cdot C \cdot \left( -e^{\frac{-t}{R \cdot C}} + e^{\frac{-t}{R_g \cdot C_g}} \right), I_{nom} \right]$$

$$I_r(I_{max}, t, R, C, t_s) := \begin{cases} \frac{V_{driver\_km}}{R_g \cdot C_g - R \cdot C} \cdot \left[ R_g \cdot C_g \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{R_g \cdot C_g}} \right) + R \cdot C \cdot \left( e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - 1 \right) \right] & \text{if } t < t_s \\ I_{nom} & \text{if } t > t_s \end{cases}$$



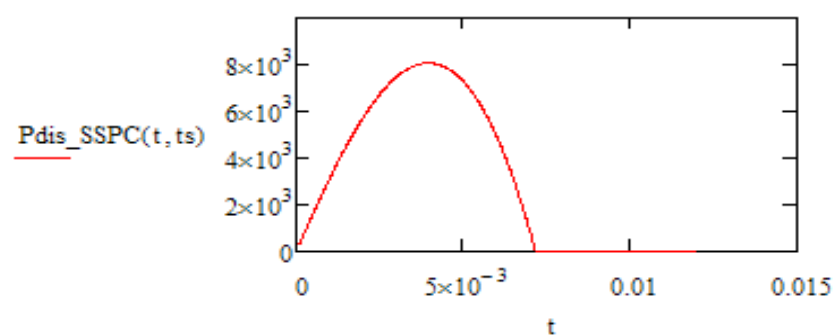
### CALCULO DE LA TENSION EN EL SSPC Y LA CARGA

$$V_{sspc}(I_{max}, t, R, C, t_s, V_{BUS}) := \text{if}(V_{BUS} > V_c(I_{max}, t, R, C, t_s), V_{BUS} - V_c(I_{max}, t, R, C, t_s), 0)$$



### CALULO DE LA POTENCIA DISIPADA

$$P_{dis\_SSPC}(t, t_s) := V_{sspc}(I_{max}, t, R, C, t_s, V_{BUS}) \cdot I_{sspc\_pasivo}(t, R_g, C_g)$$



$$P_{media} := \frac{1}{t_s} \cdot \int_0^{t_s} P_{dis\_SSPP}(t, t_s) dt$$

$$N_{mosfet} := \frac{P_{media}}{P_{SOA}}$$

## A.2 CONTROL ACTIVO CON CORRIENTE CONSTANTE

### DATOS

$$V_{BUS} := 270$$

$$I_{max} := 35$$

$$t_m := 10 \cdot 10^{-3}$$

$$R_s := 27$$

$$P_{SOA} := 1200$$

$$I_{nom} := \frac{V_{BUS}}{R}$$

$$I_{nom} = 10$$

$$t := 1 \cdot 10^{-5}, 1.03 \cdot 10^{-5} \dots t_m \cdot 1.1$$

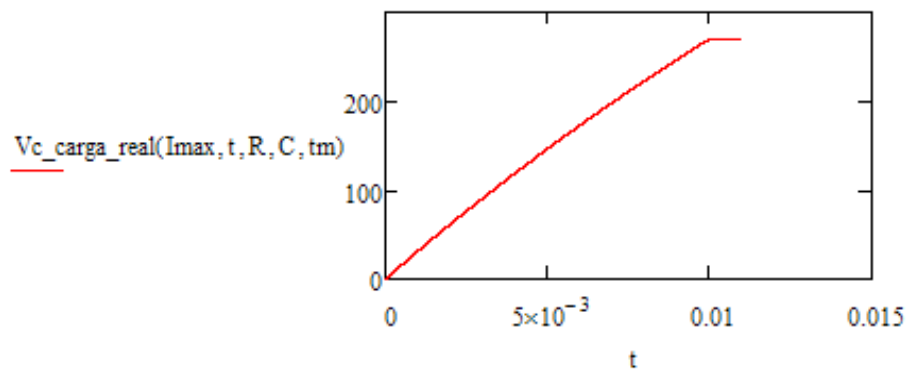
### CALCULO DEL CONDENSADOR

$$C := \frac{-t_m}{R \cdot \ln\left(1 - \frac{V_{BUS}}{I_{max} \cdot R}\right)}$$

$$C = 1.101 \times 10^{-3}$$

### CALCULO DE LA TENSION EN EL CONDENSADOR

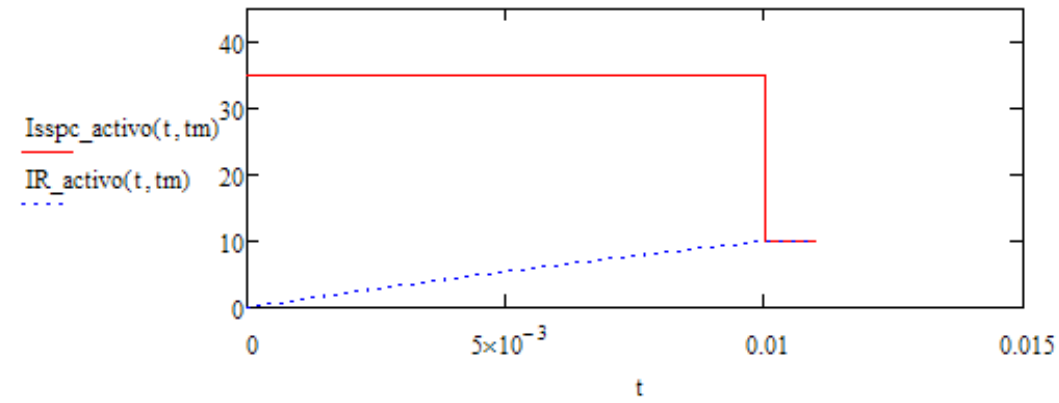
$$V_{c\_carga\_real}(I_{max}, t, R, C, t_m) := \text{if} \left[ t < t_m, I_{max} \cdot R \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}}\right), V_{BUS} \right]$$



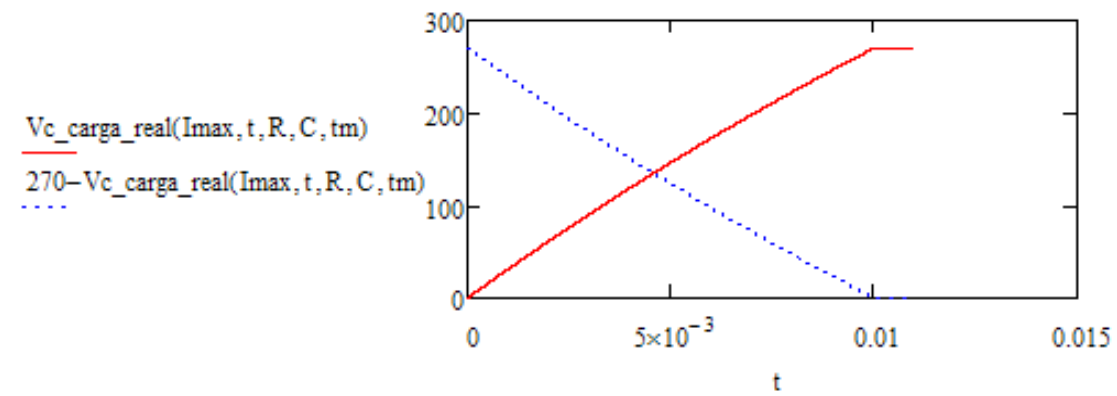
### CALCULO DE LA CORRIENTE POR EL SSPC Y LA CARGA

$$IR\_activo(t, tm) := \text{if} \left( t < tm, \frac{Vc\_carga\_real(I_{max}, t, R, C, tm)}{R}, I_{nom} \right)$$

$$Isspc\_activo(t, tm) := \text{if}(t < tm, I_{max}, I_{nom})$$

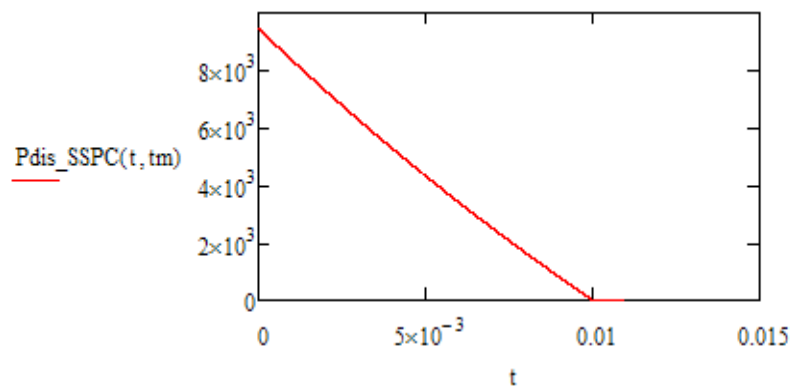


### CALCULO DE LA TENSIÓN EN EL SSPC Y LA CARGA



### CALCULO DE LA POTENCIA DISIPADA

$$Pdis\_SSPC(t, tm) := Isspc\_activo(t, tm) \cdot (VBUS - Vc\_carga\_real(I_{max}, t, R, C, tm))$$



$$P_{media} := \frac{1}{t_m} \cdot \int_0^{t_m} P_{dis\_SSPC}(t, t_m) dt$$

$$P_{media} = 4.461 \times 10^3$$

$$N_{mosfet} := \frac{P_{media}}{P_{SOA}} = 3.717$$

### A.3 CONTROL ACTIVO CON DERIVADA CONSTANTE DE LA CORRIENTE

#### DATOS

$$P_{SOA} := 1200$$

$$VBUS := 270$$

$$I_{max} := 45$$

$$ts := 10 \cdot 10^{-3}$$

$$R_{\text{cable}} := 27$$

$$I_{nom} := \frac{VBUS}{R}$$

$$I_{nom} = 10$$

$$I_r := \frac{I_{nom}}{I_{max}}$$

$$t := 1 \cdot 10^{-5}, 1.03 \cdot 10^{-5} \dots ts \cdot 1.5$$

#### CALCULO DEL CONDENSADOR

##### Método 1 Simplificado por aproximación de Taylor. Ecuación cuadrática

$$C_{\text{maximo\_real\_taylor}}(VBUS, ts, I_{max}, I_{nom}, R) := \frac{ts}{(4 \cdot VBUS)} \cdot \left( I_{max} + \sqrt{I_{max}^2 - \frac{8 \cdot VBUS \cdot I_{max}}{3 \cdot R}} \right)$$

$$C_c := C_{\text{maximo\_rampa}}(VBUS, ts, I_{max}, I_{nom})$$

$$C_{\text{maximo\_real\_taylor}}(VBUS, ts, I_{max}, I_{nom}, R) = 6.826 \times 10^{-4}$$

##### Método 2 Simplificado por aproximación de Taylor. Ecuación cubica

$$Cubica := ts \cdot \frac{I_{max}}{6 \cdot VBUS} + \frac{\frac{3 \sqrt{(-1 + 3 \cdot I_r - 4.5 \cdot I_r^2) + \frac{2 \sqrt{8 - 48 \cdot I_r + 130 I_r^2 - 140 I_r^3 + 81 I_r^4}}{2}} \cdot ts}{6 \cdot I_r} - \frac{ts^2 \cdot (-1 + 2 \cdot I_r)}{36 \cdot I_r^2 \cdot \left[ \frac{3 \sqrt{(-1 + 3 \cdot I_r - 4.5 \cdot I_r^2) + \frac{2 \sqrt{8 - 48 \cdot I_r + 130 I_r^2 - 140 I_r^3 + 81 I_r^4}}{2}} \cdot ts}{6 \cdot I_r} \right]}}{R}$$

$$Cubica = 7.009 \times 10^{-4}$$

### Método 3 Simplificado por aproximación gráfica

$$C_{\text{maximo\_rampa}}(VBUS, ts, I_{\text{max}}, I_{\text{nom}}) := \frac{1}{VBUS} \cdot \left[ (ts) \cdot \left( \frac{I_{\text{max}}}{2} - \frac{I_{\text{nom}}}{3} \right) \right]$$

$$C := C_{\text{maximo\_rampa}}(VBUS, ts, I_{\text{max}}, I_{\text{nom}})$$

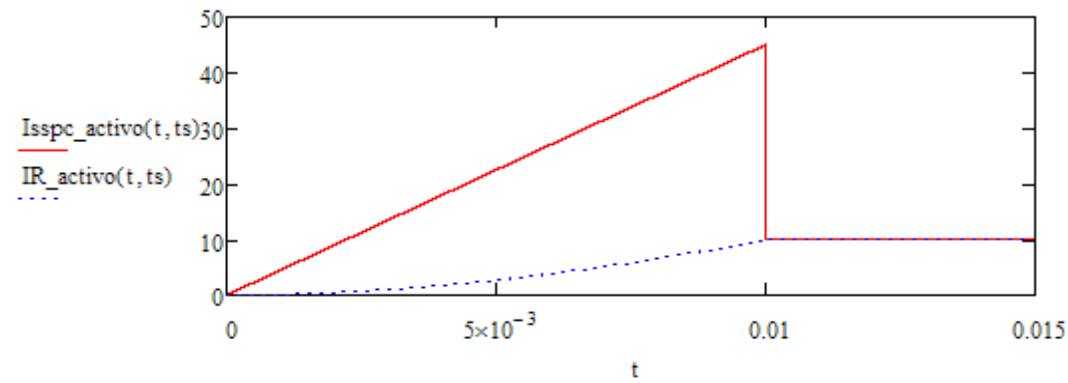
$$C = 7.099 \times 10^{-4}$$

$$\text{carga\_real\_resistencia}(I_{\text{max}}, R, C, ts) := \frac{I_{\text{max}}}{ts} \cdot \left[ - \left( e^{\left( \frac{-ts}{R \cdot C} \right)} \cdot R^2 \cdot C^2 + \frac{ts^2}{2} + R^2 \cdot C^2 - ts \cdot C \cdot R \right) \right]$$

### CALCULO DE LA CORRIENTE POR EL SSPC Y LA CARGA

$$I_{\text{sspc\_activo}}(t, ts) := \text{if} \left( t < ts, \frac{I_{\text{max}}}{ts} \cdot t, I_{\text{nom}} \right)$$

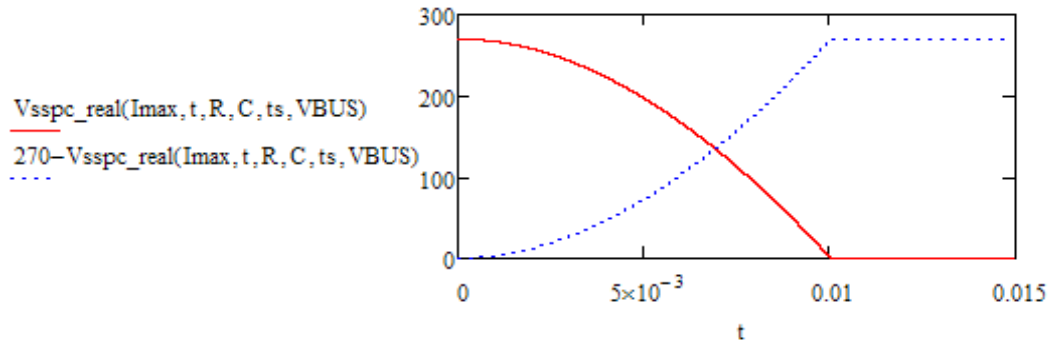
$$I_{\text{R\_activo}}(t, ts) := \text{if} \left[ t < ts, \frac{I_{\text{max}}}{ts} \cdot \left( t + R \cdot C \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - R \cdot C \right), I_{\text{nom}} \right]$$



### CALCULO DE LA TENSIÓN EN EL SSPC Y LA CARGA

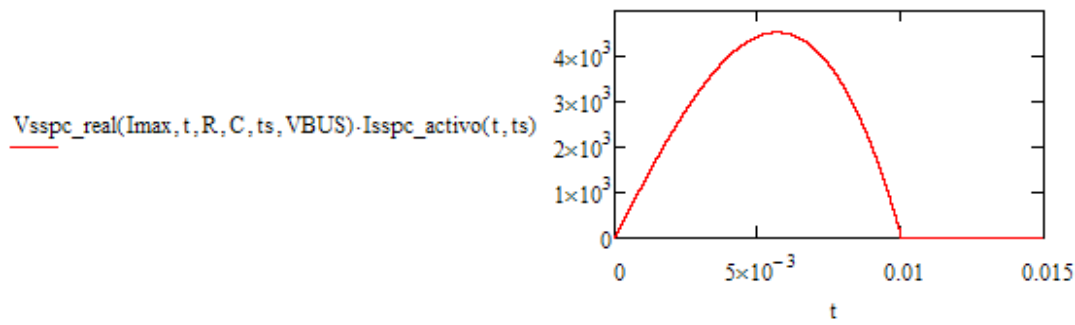
$$V_{\text{sspc\_real}}(I_{\text{max}}, t, R, C, ts, VBUS) := \text{if} \left[ t < ts, VBUS - \left[ \frac{I_{\text{max}}}{ts} \cdot R \cdot \left( t + R \cdot C \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - R \cdot C \right) \right], 0 \right]$$





### CALCULO DE LA POTENCIA DISIPADA

$$P_{dis\_SSPC}(V_{sspc}, I_{sspc}, t, t_s) := V_{sspc}(t, t_s) \cdot I_{sspc\_activo}(t, t_s)$$



$$P_{media} := \frac{1}{t_s} \int_0^{t_s} V_{sspc\_real}(I_{max}, t, R, C, t_s, V_{BUS}) \cdot I_{sspc\_activo}(t, t_s) dt$$

$$P_{media} = 2.956 \times 10^3$$

$$N_{mosfet} := \frac{P_{media}}{P_{SOA}} = 2.463$$

## A.4 CONTROL ACTIVO GENERALIZADO

### DATOS

$$V_{BUS} := 270$$

$$I_{max} := 25$$

$$t_c := 0.01$$

$$R_s := 27$$

$$P_{SOA} := 1200$$

$$t_s := 0.5t_c$$

$$I_{nom} := \frac{V_{BUS}}{R}$$

$$I_{nom} = 10$$

$$t_m := 0.5 \cdot t_c$$

$$t := 1 \cdot 10^{-7}, 1.5 \cdot 10^{-7} \dots t_c \cdot 1.1$$

### CALCULO DEL CONDENSADOR

$$C_{maxima\_mant}(V_{BUS}, t_s, t_m, I_{max}, I_{nom}) := \frac{t_s}{R} \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot \frac{I_{nom}}{I_{max}}} - \frac{1}{3} \right) + \frac{-t_m}{R \cdot \ln \left( 1 - \frac{I_{nom}}{I_{max}} \right)}$$

$$C_{maxima\_mant}(V_{BUS}, t_s, t_m, I_{max}, I_{nom}) = 5.323 \times 10^{-4}$$

$$C_s := C_{maxima\_mant}(V_{BUS}, t_s, t_m, I_{max}, I_{nom})$$

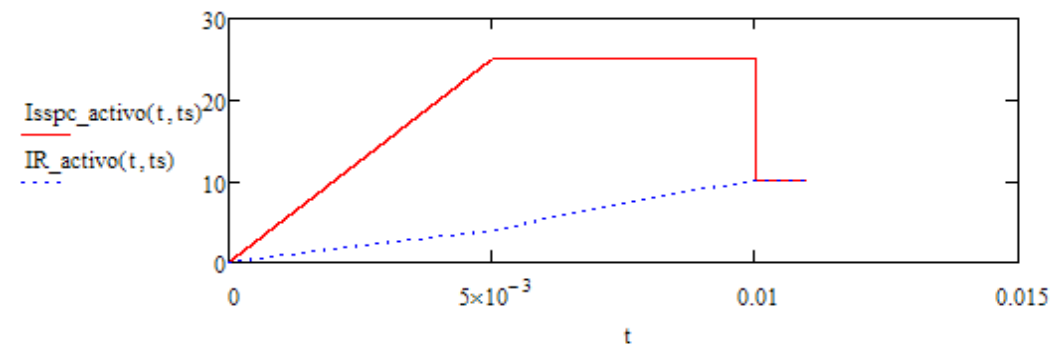
### CALCULO DE LA TENSION EN EL CONDENSADOR

$$V_c(I_{max}, t, R, C, t_s) := \begin{cases} \frac{I_{max}}{t} \cdot R \cdot \left( t + R \cdot C \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - R \cdot C \right) & \text{if } t < t_s \\ R \cdot I_{max} + \left( \frac{I_{max}}{t_s} \cdot R \cdot R \cdot C \right) \cdot \left[ e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - e^{\frac{-(t_s-t)}{R \cdot C}} \right] & \text{if } t_s < t < t_c \\ V_{BUS} & \text{if } t > t_c \end{cases}$$

### CALCULO DE LA CORRIENTE POR EL SSPC Y LA CARGA

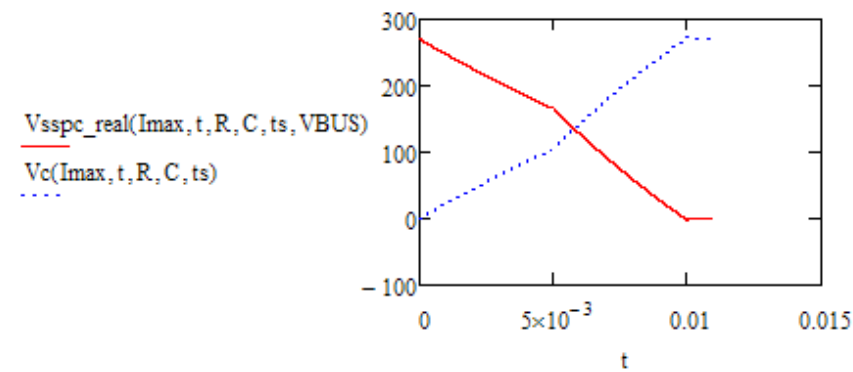
$$I_{sspc\_activo}(t, ts) := \begin{cases} I_{max} \cdot \frac{t}{ts} & \text{if } t < ts \\ I_{max} & \text{if } ts < t \\ I_{nom} & \text{if } t > tc \end{cases}$$

$$IR\_activo(t, ts) := \frac{V_c(I_{max}, t, R, C, ts)}{R}$$



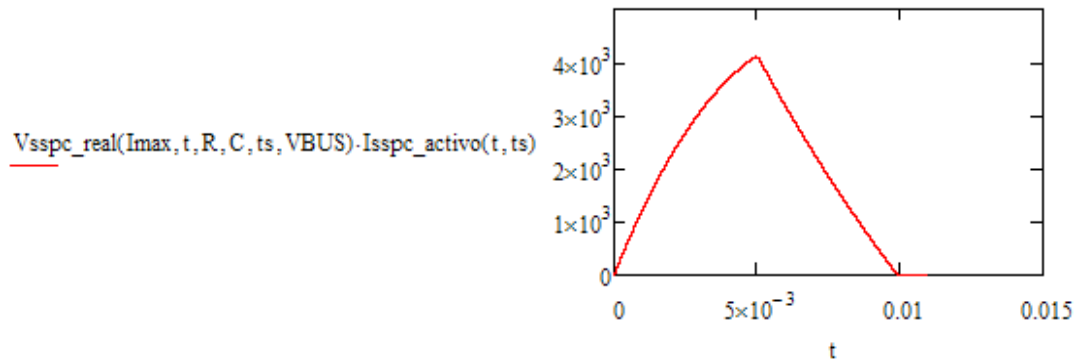
### CALCULO DE LA TENSION EN EL SSPC Y LA CARGA

$$V_{sspc\_real}(I_{max}, t, R, C, ts, VBUS) := VBUS - V_c(I_{max}, t, R, C, ts)$$



### CALULO DE LA POTENCIA DISIPADA

$$P_{dis\_SSPC}(V_{sspc}, t, ts) := V_{sspc\_real}(I_{max}, t, R, C, ts, VBUS) \cdot I_{sspc\_activo}(t, ts)$$



$$P_{media} := \frac{1}{t_c} \cdot \int_0^{t_s+t_m} Vsspc\_real(I_{max}, t, R, C, t_s, VBUS) \cdot Isspc\_activo(t, t_s) dt$$

$$P_{media} = 2.194 \times 10^3$$

$$N_{mosfet} := \frac{P_{media}}{P_{SOA}} = 1.828$$

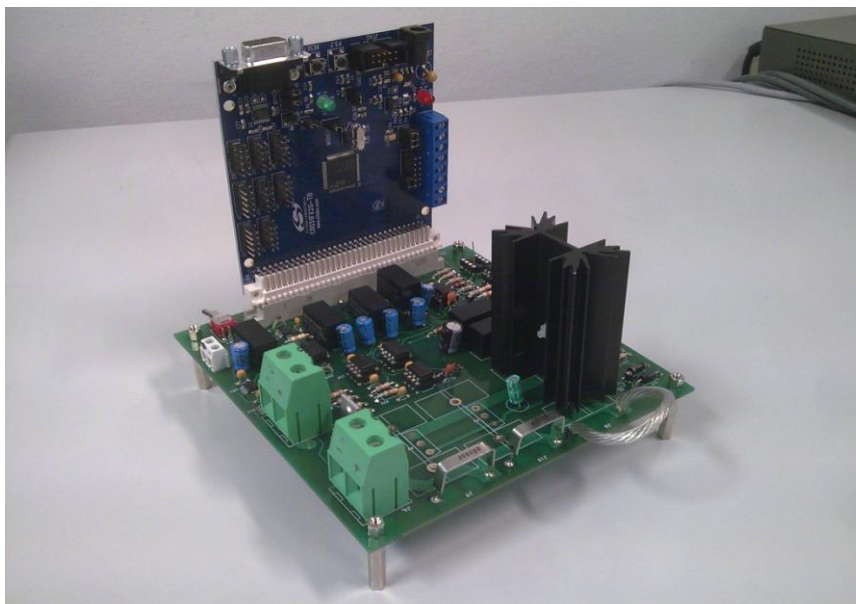
# **Anexo B**

Fotos de los prototipos

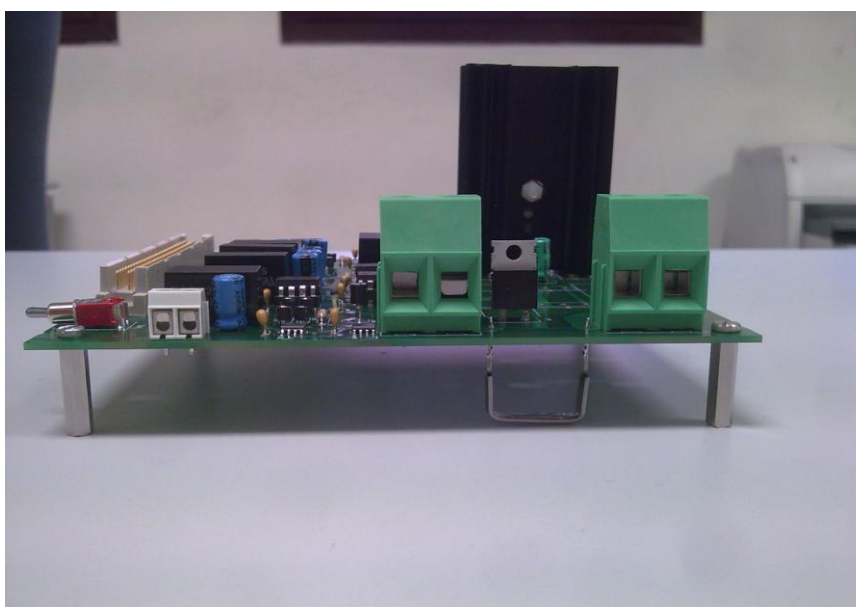


### **B.1 Prototipo final**

A continuación se muestran varias fotografías correspondientes al prototipo final desarrollado en esta tesis doctoral.



**Figura B 1: Vista en Alzado del prototipo final**



**Figura B 2: Vista de Perfil del prototipo final, sin tarjeta de control**

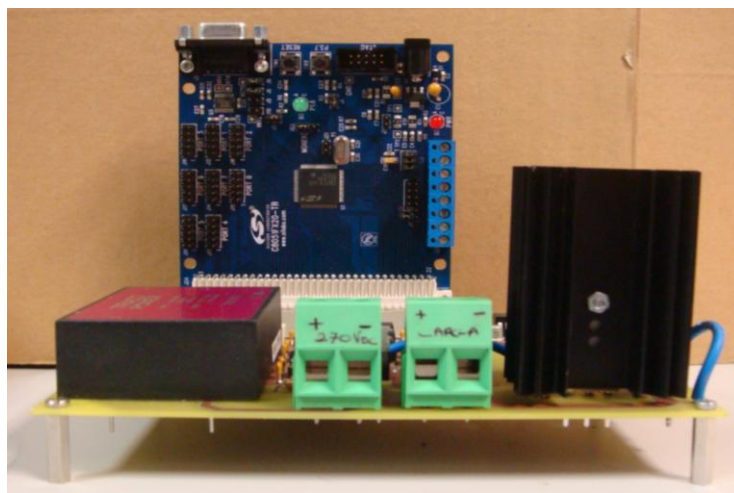


**Figura B 3: Vista en Planta del prototipo final, sin tarjeta de control**

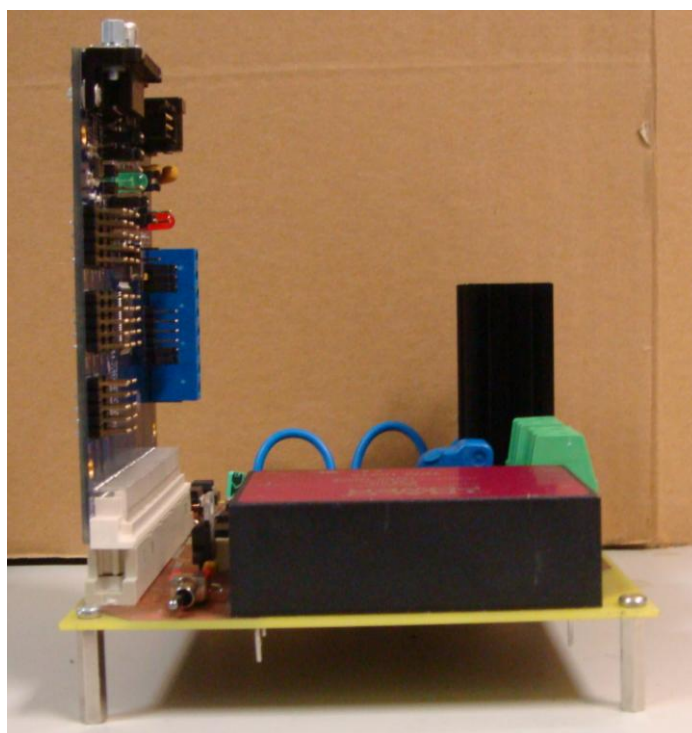


## **B.2 Prototipo inicial**

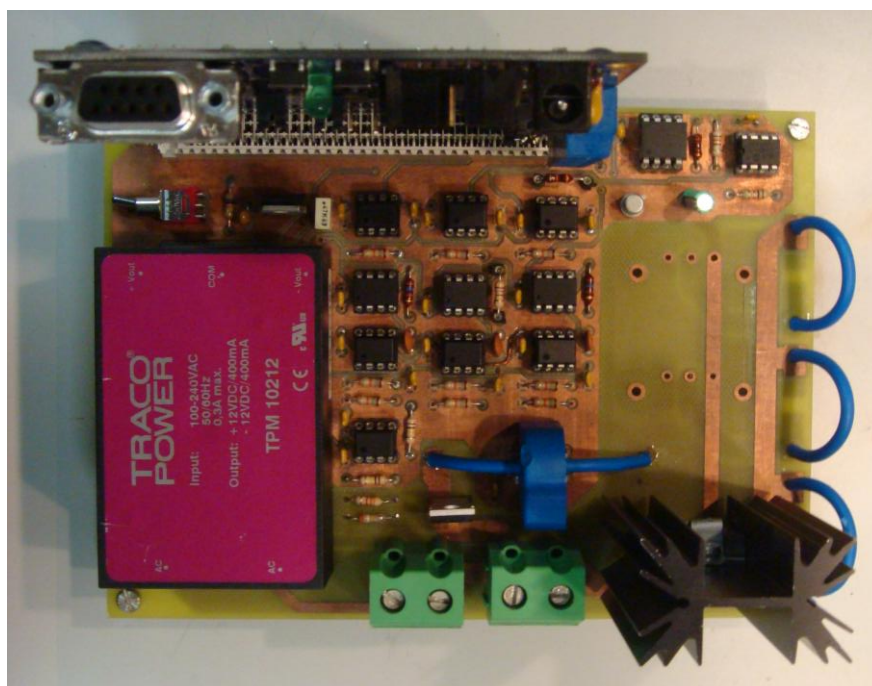
A continuación, se muestra varias fotografías relativas al prototipo inicial desarrollado en esta tesis doctoral.



**Figura B 4: Vista en Alzado del prototipo inicial**



**Figura B 5: Vista de Perfil del prototipo inicial**



**Figura B 6: Vista en Planta del prototipo inicial**

